



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

Avaliação da determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica com recurso à Termografia

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Construções

Autor

Joana Raquel Raimundo Riachos

Orientadores

Prof. Doutor Nuno Albino Vieira Simões

Doutora Maria Inês Vieira Simões

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

Com a colaboração:



Coimbra, julho, 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Nuno Simões pelo seu acompanhamento, apoio e incentivo constante ao longo deste trabalho, com o qual tive a oportunidade de desenvolver este projecto e por quem sempre tive grande respeito e admiração.

Agradeço de igual modo, à Doutora Inês Simões, que participou em todo o processo de desenvolvimento e análise laboratorial, tendo demonstrado sempre disponibilidade e partilha de conhecimento, contribuindo para a minha formação académica.

Agradeço ao ITeCons pela colaboração neste projecto de investigação, como aos colaboradores (Saúl Martins e Filipe Pedro) pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho laboratorial. À Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT), no âmbito da pesquisa do projeto PTDC/ECM/114189/2009. Este trabalho também foi apoiado pela Energia e Mobilidade para Regiões Sustentáveis - EMSURE – Projecto (CENTRO-07-0224-FEDER-002004).

Um agradecimento muito especial à Isabel Valente e à Professora Manuela Soares, por serem pessoas extraordinárias, garantindo-me que tudo pode ser feito com sucesso.

Agradeço à minha família, por serem o meu suporte, a minha base, estando sempre presente nos bons e maus momentos. Durante estes cinco anos foram a minha motivação para a concretização dos meus objectivos. Salientando o meu irmão, pela pessoa que é, pelos seus objectivos, pela sua forma de estar e encarar todos os seus desafios, levando-me a querer ir mais longe a nível académico, profissional e pessoal. Ao Vicente, pelo seu sorriso e alegria em todos os momentos e agora à alegria que trará o Sebastião, motivando-me para no futuro poder ser um exemplo também para eles.

Por último, aos meus amigos que fizeram parte do meu percurso académico e com os quais tive a felicidade de partilhar a minha experiência de vida em Coimbra, marcando a minha forma de ser.

RESUMO

Na União Europeia (UE), quase 40% do consumo final de energia é atribuível à habitação. A Europa 2020 define como metas, que as emissões de gases com efeito estufa deve ser 20% menor, 20% da energia deve ser proveniente de fontes renováveis e um aumento da eficiência energética em 20%. Com estes objectivos definidos, considera-se importante um adequado conhecimento do consumo de energia em edifícios.

De forma a compreender o desempenho térmico das envolventes dos edifícios, em particular durante as auditorias energéticas e processos de certificação, tem vindo a tornar-se importante o uso de técnicas que permitam aferir o coeficiente de transmissão térmica (U) das soluções construtivas.

A determinação do valor de U tem-se revelado um desafio sempre que a constituição da solução construtiva é desconhecida. Nestes casos pode ser estimado, por exemplo, através da técnica dos termofluxímetros ou por aplicação da técnica de termografia infravermelha (IRT).

A IRT consiste na aplicação de uma técnica, com ausência de contacto, em relação à superfície em estudo, que recorre a um dispositivo de aquisição de radiação infravermelha para adquirir imagens térmicas. Uma vez que todos os corpos emitem radiação infravermelha em quantidade proporcional à quarta potência da sua temperatura e emissividade da sua superfície, é possível, através desta técnica, estimar as temperaturas superficiais. Assumindo um regime permanente essas temperaturas superficiais, em simultâneo com a temperatura ambiente, podem ser usadas para estimar a transmissão térmica através de soluções construtivas.

Neste trabalho é avaliada a aplicação da técnica de termografia infravermelha para determinação da resistência térmica de soluções construtivas compostas por uma camada ou multicamada. Para este efeito são consideradas três expressões alternativas para estimar o valor de U. Os coeficientes estimados com o apoio da técnica de IRT são comparados com os calculados de acordo com a ISO 6946:2007 e também com os obtidos com termofluxímetros

ABSTRACT

In the European Union (EU), almost 40% of energy consumption is attributable to housing. Europe 2020 sets as goals, among others, that emissions of greenhouse gases should be 20% less than in 1990, 20% of energy should come from renewable sources and increased energy efficiency by 20%. With these objectives, it is considered important to understanding the energy consumption of buildings.

In order to understand the thermal performance of the surrounding buildings, in particular for energy audits and certification processes, has become important to use techniques to obtain the value of heat transfer coefficient (U) in constructive solutions.

The determination of the U -value, has proved a challenge when the constitution of the constructive solution is unknown. In such cases, it maybe estimated, for example, through the technique of heat flux sensors or by applying infrared thermography (IRT).

The IRT, the application of this technique, with no contact to the surface under study, which uses an acquisition device to acquire infrared thermal imaging. All objects radiate energy that is proportional to the surface emissivity of the material and to the fourth power of the absolute temperature, it is possible using this technique to estimate the surface temperature. Assuming a steady-state these surface temperatures with the surrounding temperature can be used to estimate the heat transfer through constructive solutions.

In this work it was evaluated the technique of the infrared thermography to determine the thermal resistance of single-layers and multi-layers of constructive solutions. For this purpose are considered three alternatives to obtain the U -value. The coefficients obtain with those expressions are compared with the coefficients determined with ISO 6946:2007 and also with heat flow sensors.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do Trabalho	4
2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA TRANSMISSÃO DE CALOR NA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS.....	6
2.1 Fenómenos de transmissão de calor	7
2.2 Técnica de termografia infravermelha.....	10
2.3 Determinação do coeficiente de transmissão térmica com recurso à técnica de termografia infravermelha	13
2.3.1 Método proposto por Fokaides e Kalogirou.....	13
2.3.2 Método proposto por Albaciti e Tonelli	15
2.3.3 Método proposto por Vollmer e Möllmann.....	16
2.3.4 Métodos adaptados ao problema	17
2.4 Método teórico para cálculo do coeficiente de transmissão térmico.....	19
2.5 Método do termofluxímetro.....	22
3 PARÂMETROS QUE AFECTAM A APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA NA DETERMINAÇÃO DE U.....	24
3.1 Temperatura superficial.....	24
3.2 Emissividade superficial.....	26
3.3 Temperatura reflectida.....	27
3.4 Velocidade do vento	28
4 CASOS DE ESTUDO DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....	29
4.1 Caixa de Ensaio	29
4.2 Hot-Box.....	33
5 RESULTADOS	40
5.1 Resultados obtidos na Caixa de Ensaio	40
5.1.1 Sistema camada simples	42
5.1.2 Sistema multicamada.....	46
5.2 Resultados obtidos na Hot-Box	47
5.2.1 Janela	47
5.2.2 Parede	50
6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	52
6.1 Parâmetros de calibração das medições de termografia infravermelha.....	52
6.2 Temperatura reflectida.....	54

6.3 Emissividade.....	55
6.4 Velocidade do vento	57
6.5 Relevância das componentes da radiação e convecção no valor do coeficiente de transmissão térmica	58
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXO A – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: TEMPERATURA REFLECTIDA.....	1
ANEXO B – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: EMISSIVIDADE.....	1
ANEXO C – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: VELOCIDADE DO VENTO.....	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Esquema da geometria do problema de um sistema composto por uma camada homogénea plana, em regime permanente de transferência de calor.	7
Figura 2.1.2 – Esquema da geometria do problema de um sistema multicamada, em regime permanente de transferência de calor.	9
Figura 2.2.1 – Fachada exterior revestida a ladrilho, durante exposição solar: a) fotografia digital; b) termograma em que se identifica o tipo de colagem realizado.	11
Figura 2.2.2 – Fachada de um edifício: a) fotografia digital; b) termograma com evidência da estrutura resistente.	12
Figura 2.3.4.1 – Ilustração da avaliação da transferência de calor apresentada pelas expressões para cálculo do coeficiente de transmissão térmica consideradas pelos diferentes autores: a) Eq.(12) e Eq.(21); b) Eq.(16).	18
Figura 2.5.1 – Termofluxímetro: sensores de fluxo e termopares.	22
Figura 3.1.1 – Influência da radiação emitida pelo objecto e pela atmosfera na leitura efectuada pelo sensor térmico, adaptado de (Fokaides e Kalogirou, 2011).	25
Figura 3.3.1 – Medição da temperatura reflectida através da câmara de termografia infravermelha com recurso a papel de alumínio: a) fotografia digital; b) termograma gerado com marcação da área de medição da temperatura reflectida.	28
Figura 4.1.1 – Sistema da caixa de ensaio: a) sistema composto pela câmara de termografia infravermelha, fonte de calor, computador, data logger e termofluxímetro; b) provete de ensaio : visualização do interior segundo o corte AA', em planta para visualização da distribuição dos materiais utilizados, segundo o corte BB'	29
Figura 4.1.2 – Termogramas obtidos no início da campanha laboratorial que revelam a distribuição não uniforme de temperatura – MDF.	31
Figura 4.1.3 – Visualização da localização do sistema de ventilação, segundo o corte AA' ...	32
Figura 4.1.4 – Termogramas da superfície exterior da placa de MDF evidenciando uma distribuição uniforme de temperatura.	32
Figura 4.2.1 – Ilustração da Hot-Box.	34
Figura 4.2.2 – Janela utilizada em ensaio realizado na Hot-Box: a) Vista geral do provete; b) Pormenor da superfície do caixilho da janela.	36
Figura 4.2.3 – Esquema de ensaio da janela, instalada no interior da Hot-Box.	36

Figura 4.2.4 – Termogramas da janela com distribuição uniforme de temperatura das seguintes componentes: a) vidro; b) caixilho.	37
Figura 4.2.5 – Representação esquemática de parede composta por 18 mm de OSB (1), 70 mm de polyester (2) e 13 mm de gesso cartonado (3).	38
Figura 4.2.6 – Preparação da parede para medições na Hot-box - a) Vista da superfície de gesso cartonado; b) Vista da superfície de OSB.	38
Figura 4.2.7 – Termograma da parede, retirado em regime permanente, evidenciando a uniformização de temperaturas.	39
Figura 5.1.1 – Representação esquemática da vista frontal do sensor de fluxo e os respectivos termopares sobre a superfície exterior de cada solução construtiva.	41
Figura 5.1.1.2 – Termogramas do ensaio do MDF: a) 1º ensaio; b) 2º ensaio; c) 3º ensaio. ...	42
Figura 5.2.1.1 – Termogramas de cada ensaio da janela obtidos no vidro: a) 1º ensaio; b) 2º ensaio; c) 3º ensaio.	48
Figura 5.2.1.2 – Termogramas de cada ensaio da janela zona do caixilho: a) 1º ensaio; b) 2º ensaio; c) 3º ensaio.	49
Figura 5.2.2.1 – Termograma do ensaio da parede retirado na câmara “quente”, com características de ambiente interior.	51

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.4.1 – Coeficiente de convecção em espaço interior.....	20
Quadro 4.1.1 – Apresentação das características geométrica e térmicas de cada material: espessura, coeficiente de condutibilidade térmica, massa volúmica, calor específico e coeficiente de difusidade térmica.	30
Quadro 4.1.2 – Emissividade determinada de acordo com a ASTM 1933 (1999) de cada solução construtiva.	33
Quadro 4.2.1 – Resistência térmica de elementos constituintes da janela, o vidro e a caixilharia.	35
Quadro 5.1.1.1 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio do MDF.....	42
Quadro 5.1.1.2 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – MDF.	42
Quadro 5.1.1.3 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio do XPS.	43
Quadro 5.1.1.4 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – XPS.....	43
Quadro 5.1.1.5 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio do CBPB.	43
Quadro 5.1.1.6 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – CBPB.....	43
Quadro 5.1.1.7 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio do NC.....	44
Quadro 5.1.1.8 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – NC.	44
Quadro 5.1.1.9 – Erro máximo relativo obtido por comparação da resistência térmica teórica com a (R_t) resistência térmica experimental e com a (R_{HF}) resistência térmica obtida pelo termofluxímetro.	45
Quadro 5.1.2.1 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio de uma sistema multicamada.....	46
Quadro 5.1.2.2 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – Sistema Multicamada.	46
Quadro 5.2.1.1 – Coeficiente de transmissão térmica de elementos constituintes da janela: vidro e caixilho.	47
Quadro 5.2.1.2 – Temperatura e emissividade obtidas em cada ensaio da janela: Vidro.	48

Quadro 5.2.1.3 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica do Vidro e apresentação do erro relativo.....	48
Quadro 5.2.1.4 – Erro máximo relativo obtido por comparação da resistência térmica teórica do Vidro com a resistência térmica experimental e com a resistência térmica obtida pelo termofluxímetro.....	48
Quadro 5.2.1.5 – Temperatura e emissividade obtidas em cada ensaio da janela: Caixilharia.....	49
Quadro 5.2.1.6 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica do caixilho e apresentação do erro relativo, obtido por comparação dos coeficientes referidos. .	49
Quadro 5.2.2.1 – Temperatura e emissividade obtidas no ensaio da parede.....	50
Quadro 5.2.2.2 – Resultados teórico e experimental da resistência térmica da Parede e apresentação do erro relativo obtido por comparação das resistências referidas.	51
Quadro 5.2.2.3 – Erro máximo relativo obtido por comparação da resistência térmica teórica da Parede com a resistência térmica experimental e com a resistência térmica obtida pelo termofluxímetro.....	51
Quadro 6.1.1 – Diferença entre a temperatura superficial exterior (θ_{se}) medida pela câmara de termografia com aplicação do factor de correcção com a temperatura superficial exterior medida pelo termopar (θ_{se}^{TP}) no MDF.	53
Quadro 6.1.2 – Diferença entre a temperatura superficial exterior (θ_{se}) medida pela câmara de termografia com aplicação do factor de correcção com a temperatura superficial exterior medida pelo termopar (θ_{se}^{TP}) para o ensaio na Hot-box com a janela - Vidro.....	54
Quadro 6.2.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º ensaio...54	54
Quadro 6.2.2 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.....	55
Quadro 6.3.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando uma variação de cerca de 0.05 na emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.	56
Quadro 6.3.2 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.....	56
Quadro 6.4.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.	57
Quadro 6.4.2 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.....	58
Quadro 6.5.1 – Importância da componente da radiação resultados obtidos no 1º ensaio: MDF e NC.....	59
Quadro 6.5.2 – Importância da componente da convecção resultados obtidos no 1º ensaio: MDF e NC.	59

Quadro A.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.....	1
Quadro A.2 – Erro relativo associado ao XPS considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	1
Quadro A.3 – Erro relativo associado ao CBPB considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	2
Quadro A.4 – Erro relativo associado ao NC considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	2
Quadro A.5 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.....	3
Quadro A.6 – Erro relativo associado ao caixilho da janela considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	3
Quadro A.7 – Diferença entre a temperatura superficial exterior medida pela câmara de termografia com aplicação do factor de correcção com a temperatura superficial exterior medida pelo termopar (T) – Caixa de ensaio.....	4
Quadro A.8 – Diferença entre a temperatura superficial exterior medida pela câmara de termografia com aplicação do factor de correcção com a temperatura superficial exterior medida pelo termopar (T) – Hot-box.....	4
Quadro B.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.....	1
Quadro B.2 – Erro relativo associado ao XPS considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	1
Quadro B.3 – Erro relativo associado ao CBPB considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	2
Quadro B.4 – Erro relativo associado ao NC considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	2
Quadro B.5 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.....	3
Quadro B.6 – Erro relativo associado ao caixilho da janela considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º.....	3
Quadro C.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.....	1

Quadro C.2 – Erro relativo associado ao XPS considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	1
Quadro C.3 – Erro relativo associado ao CBPB considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	2
Quadro C.4 – Erro relativo associado ao NC considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.....	2
Quadro C.5 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 2º e 3º.....	3
Quadro C.6 – Erro relativo associado ao caixilho da janela considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º.....	3

SIMBOLOGIA

- A – área de uma superfície (m^2)
 c – calor específico ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 e_j – espessura da camada j (mm)
 E – erro relativo (%)
 h_c – coeficiente de convecção ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
 h_{ce} – coeficiente de convecção exterior ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
 h_{ci} – coeficiente de convecção interior ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
 h_r – coeficiente de radiação ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
 h_{re} – coeficiente de radiação exterior ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
 h_{ri} – coeficiente de radiação interior ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
 K – coeficiente de difusividade térmica ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
 Q – fluxo de calor (W)
 Q_{CONV} – fluxo de calor associado à componente de convecção (W)
 Q_{RAD} – fluxo de calor associado à componente de radiação (W)
 R – resistência térmica de um elemento ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$)
 R_s – resistência térmica superficial ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$)
 R_{se} – resistência térmica superficial exterior ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$)
 R_{si} – resistência térmica superficial interior ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$)
 R_t – resistência térmica teórica ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$)
 U – coeficiente de transmissão térmica ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
 U_{LAB} – coeficiente de transmissão térmica experimental ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
 U_t – coeficiente de transmissão térmica teórico ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

 α_{RAD} – coeficiente de radiação
 ε – emissividade (-)

-
- θ_{mean} – média da temperatura reflectida com a temperatura superficial da solução construtiva (K)
- θ_m – média da temperatura superficial do elemento com a temperatura ambiente (K)
- θ_{me} – média da temperatura superficial exterior com a temperatura ambiente exterior (K)
- θ_{mi} – média da temperatura superficial interior com a temperatura ambiente interior (K)
- θ – temperatura (K)
- θ_a – temperatura ambiente (K)
- θ_s – temperatura do corpo radiante (K)
- θ_{viz} – temperatura do corpo receptor (K)
- θ_e – temperatura exterior (K)
- θ_i – temperatura interior (K)
- θ_{REF} – temperatura reflectida (K)
- θ_{se} – temperatura superficial exterior (K)
- θ_{se}^{TP} – temperatura superficial exterior medida pelo termopar (K)
- θ_{si} – temperatura superficial interior (K)
- λ – coeficiente de condutibilidade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- λ_j – coeficiente de condutibilidade térmica da camada j ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- v – velocidade do vento (m.s^{-1})
- ρ – massa volúmica (kg.m^{-3})
- σ – constante de Stefan-Boltzmann, $5.67\text{E-}08$ ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)
- τ – transmitância atmosférica

ABREVIATURAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

EN – European standard

IRT – Infrared thermography Technique

ISO – International Organization for Standardization

UE – União Europeia

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivação

Enfrentamos uma época de crescente preocupação com as alterações climáticas e as suas principais consequências. O parque edificado, que compõe a União Europeia, consome cerca de 40 % da energia primária. De forma a compreender qual o motivo que promove o elevado consumo de energia, tornou-se importante fazer uma estimativa do desempenho térmico dos edifícios, por meio de auditorias energéticas e de processos de certificação energética (European Directive (2010/31/UE), (2002/91/EC)).

Face a determinadas modificações ambientais, a Europa desenvolveu um plano estratégico denominado 20/20/20 (EC@ 2014). Este deverá ser seguido por todos os estados membro, apresentando três objetivos fundamentais. Primeiro, prevê-se uma redução de 20 % das emissões com gases de efeito estufa, paralelamente deverá ocorrer um aumento em 20 % de utilização de energia proveniente de fontes renováveis, melhorando deste modo, a eficiência energética europeia em 20 %. Estas medidas pretendem melhorar o conforto em edifícios habitacionais e espaço públicos, promovendo a eficiência energética. Do ponto de vista do utilizador pressupõe-se um decréscimo do consumo de energia nas atividades humanas associadas à utilização de equipamentos.

Nos edifícios, habitacionais ou serviços, existem inúmeras lacunas que levam a grandes desperdícios de energia, aumentando conseqüentemente o uso desta. Muitas das fraquezas partem da forma como foi realizada a construção e dos materiais empregues na mesma. Além das soluções inadequadas, a degradação do edifício e o envelhecimento de alguns dos seus elementos, como caixilharia, portas, isolamento térmico, contribuem para o aumento do consumo energético.

Tendencialmente os ocupantes dos edifícios procuram maior conforto térmico. Tendem, deste modo, a colmatar as falhas dos edifícios, com recurso a equipamentos que permitam a climatização do espaço. Contudo, esta solução conduz a um aumento do gasto energético. A diminuição do consumo de energia associado à climatização dos espaços deve ser realizado com base no balanço energético entre os ganhos e perdas térmicas que ocorrem através da envolvente do edifício e devido à sua ocupação (ISO 13789:2007, ISO 13790:2008). Assim torna-se necessário o estudo da envolvente do edifício e optimização do comportamento térmico desta.

Um dos parâmetros que caracteriza o comportamento térmico das soluções construtivas é o coeficiente de transmissão térmica. Existem diferentes metodologias que

poderão ser adoptadas para a determinação do coeficiente de transmissão térmica, como por exemplo, a aplicação das normas ISO 6946:2007 e da ISO 13786:2006, assumindo que os elementos avaliados estão sujeitos a um regime permanente de transferência de calor. Este parâmetro pode ser estimado através da ISO 6946:2007, quando conhecidas as características geométricas e térmicas dos materiais que compõe a solução e os respectivos coeficientes de condutibilidade térmica. Por outro o U pode ser determinado através de ensaios laboratoriais, por exemplo, pela colocação do provete na Hot-box (EN ISO 8990:1994). Este equipamento permite criar condições de regime permanente ou variável e servir de base à determinação do valor de U.

A determinação do U tem-se revelado mais complexa quando se pretende estudar soluções construtivas já existentes. Neste caso, pode-se recorrer a ensaios destrutivos, que permitem a identificação e medição direta da espessura dos elementos construtivos, servindo de base ao cálculo das respectivas resistências térmicas (Desogus *et al*, 2006). Em alternativa, pode-se recorrer a técnicas não-destrutivas, tais como as aplicadas por (Cabeza *et al*, 2010) e (Zarr, 2001). Estes autores estimaram a resistência térmica oferecida por soluções construtivas existentes por medição do fluxo de calor transferido através delas.

Outra técnica não-destrutiva que tem vindo a ser explorada para a determinação do U de soluções existente é a técnica de termografia infravermelha (IRT) [(Albaciti e Tonelli, 2010) e (Fokaides e Kalogirou, 2011)]. Esta técnica consiste na aquisição e análise da radiação infravermelha emitida pelos objetos de estudo. Uma vez que a radiação infravermelha é emitida por todos os objetos em quantidade proporcional à quarta potência da temperatura absoluta e emissividade das superfícies analisadas, é possível utilizar esta técnica para estimar a temperatura dos objetos. A IRT apresenta como vantagens principais a ausência de contacto com os elementos em estudo e a possibilidade de avaliação de extensas áreas de forma rápida e com visualização das medições em tempo real. Esta técnica tem revelado aplicações a vários campos, abrangendo a medicina (humana e veterinária), engenharias (electrotécnica, civil, mecânica, aeroespacial, etc.) (Quinteiro, 2009). Na área da engenharia civil tem sido utilizada para avaliação do comportamento higratérmico da envolvente [permitindo a observação de perdas de calor significativas, localização de pontes térmicas planas e lineares, infiltrações de ar (Albaciti e Tonelli, 2010), etc.], na determinação de defeitos presentes em elementos construtivos (Simões, 2013), na localização de patologias relacionadas com a presença de humidade, avaliação de conforto térmico de revestimento de pavimentos (Barreira e Freitas, 2007), etc.

Como mencionado anteriormente, a IRT usada de forma quantitativa, permite avaliar a temperatura superficial de objetos. Assim, assumindo que uma solução construtiva se encontra sujeito a um regime de transferência de calor permanente e uniforme e considerando as leis de transferência de calor, é teoricamente possível estimar a resistência térmica oferecida por essa solução construtiva (Hoyano *et al*, 1999).

De forma a aferir a fiabilidade dos métodos, devem ser avaliados os erros relativos obtidos e a reprodutibilidade do método. A garantia de reprodutibilidade serve para assegurar que diferentes técnicos podem obter resultados similares. Para esse efeito devem-se estabelecer procedimentos de medição. Assim, o objectivo geral do presente trabalho consiste na avaliação da determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica de soluções construtivas com recurso à termografia. Para melhor compreensão das variáveis com influência nos resultados, considera-se relevante a realização de estudos em contexto laboratorial com condições controladas, de modo a se analisarem em detalhe as componentes de transferência de calor por radiação, convecção e condução, e a avaliar-se a influência de parâmetros como a velocidade do ar, a emissividade e a temperatura reflectida pelos corpos na vizinhança.

1.2 Objetivos

Em edifícios existentes, a determinação do coeficiente de transmissão térmica não é imediata, por nem sempre ser possível conhecer a composição da solução. Este parâmetro permite-nos aferir a quantidade de calor que atravessa um elemento, perante um dado gradiente de temperatura. Dada a importância deste parâmetro no estudo do comportamento térmico dos edifícios, o presente trabalho tem como objectivo principal a sua quantificação através da aplicação da técnica de termografia infravermelha. Pretende-se assim explorar esta técnica de inspeção, que se caracteriza por não depender de contacto, como uma alternativa à aplicação de termofluxímetros, que representa o método de medição aplicável em edifícios existentes.

De modo a concretizar o objectivo principal é necessário:

- Realizar pesquisa bibliográfica de forma a identificar estudos relacionados com a determinação do coeficiente de transmissão térmica, em particular usando a técnica de termografia infravermelha. Nesta pesquisa, pretende-se ainda identificar os parâmetros com maior influência nas medições por radiação infravermelha;
 - Conceber um protótipo, à escala reduzida, para avaliar o uso da técnica de termografia infravermelha na estimativa do coeficiente de transmissão térmica de diferentes materiais de construção, em condições laboratoriais (designou-se este protótipo por “caixa de ensaio”);
 - Avaliar o erro relativo através da comparação com o valor teórico, através do conhecimento da condutibilidade térmica de cada solução construtiva, determinada por ensaios realizados no *Guarded Hot-Plate*;
 - Aferir a reprodutibilidade do método utilizado;
 - Aplicar a técnica de termografia infravermelha para a determinação do coeficiente de transmissão térmica em sistemas multicamada.
-

- Avaliar a influência de parâmetros de medição nos resultados obtidos em cada ensaio;

Como resultado final do trabalho, prevê-se a avaliação de que trabalhos se podem dar continuidade.

1.3 Estrutura do Trabalho

Perante a motivação e os objectivos descritos optou-se por estruturar o trabalho em três partes principais, comportando 6 capítulos. Uma das partes principais diz respeito à exploração e análise do conceito do coeficiente de transmissão térmica e a forma como será analisado ao longo do documento. Posteriormente, são focados os casos de estudo e os seus respetivos resultados. Por último, encontram-se indicados os principais parâmetros que influenciam a análise realizada, designados como fatores críticos e sobre os quais incide uma detalhada análise de sensibilidade.

No capítulo 2 apresentam-se os conceitos de transferência de calor e apresentam-se os métodos passíveis de serem utilizados na determinação ou estimativa do coeficiente de transmissão térmica. Estes são fundamentais para uma melhor compreensão da técnica utilizada. São descritas os já referidos possíveis métodos de avaliação de transferência de calor em elementos construtivos. É explicada a importância da termografia infravermelha, identificando as suas vantagens no estudo realizado. Por último, são apresentados os estudos realizados por alguns investigadores, descrevendo-se as expressões propostas por esses autores para estimar o coeficiente de transmissão térmica, as quais servirão de base ao trabalho realizado.

No capítulo 3, identificam-se cada uma das variáveis relevantes na aplicação das equações utilizadas no procedimento desenvolvido. É explorada a sua importância, quais as mais críticas e de que forma podem ser determinadas e os possíveis erros associados à sua medição. É analisada a sua influência em cada um dos casos de estudo.

No capítulo 4, é descrito cada um dos casos de estudo, “Caixa de Ensaio”, constituída por materiais térmicos, isolantes e não isolantes, e, a “Hot-Box”, onde foi avaliado o comportamento de uma janela e de uma parede, permitindo estimar a sua resistência à passagem de calor, em sistemas de camada simples ou multicamada.

O capítulo 5 é composto pelos resultados obtidos em cada um dos trabalhos realizados.

No capítulo 6 é efetuada uma análise de sensibilidade, tendo em conta as variáveis identificadas no capítulo 4. Esta análise permitirá avaliar se o processo aplicado para a sua determinação produz erros significativos, que poderão influenciar todos os resultados obtidos. É efetuada uma comparação entre das medições obtidas com o sistema de termografia utilizado e outros métodos de determinação de temperatura e de fluxo de calor (termopares e

termofluxímetros, sistemas de medição por contacto). Esta comparação teve como objetivo aferir a validade dos resultados obtidos por meio da técnica de termografia infravermelha. Para além disso foi efectuado um estudo de forma a compreender os efeitos da radiação e convecção, em cada uma das expressões analíticas utilizadas, sobre os elementos em estudo.

Em conclusão, tecem-se algumas considerações finais e sugerem-se trabalhos futuros.

2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA TRANSMISSÃO DE CALOR NA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS

O sector residencial apresenta um elevado consumo de energia, principalmente a nível de utilização de sistemas que têm como funções climatizar o ambiente interior. Contudo, as necessidades energéticas num edifício dependem do balanço energético entre os ganhos e as perdas térmicas. Para este efeito, são relevantes informações como a utilização do edifício, a zona climática em que se localiza, sua geometria e o comportamento térmico das soluções construtivas.

De acordo com a políticas europeias tem vindo a crescer a preocupação e consciencialização do desempenho térmico de cada edifício, pelo que têm vindo a ser promovidas auditorias e certificação energéticas dos mesmos. No decorrer do processo de certificação energética do património já edificado tem existido dificuldades acrescidas na caracterização térmica da envolvente, nomeadamente, na determinação dos respetivos coeficientes de transmissão térmica.

Como alternativa aos ensaios destrutivos, tem vindo a ser propostos por diversos autores a aplicação de métodos não-destrutivos (por exemplo, instalação de medidores de fluxo de calor e aplicação técnica da termografia infravermelha). Rossano Albaciti e M. Tonelli, aplicaram a técnica de termografia infravermelha. Através do procedimento estabelecido pelos autores, foi possível estimar o coeficiente de transmissão térmica,

Como referido anteriormente, a presente dissertação tem como objetivo a avaliação da técnica de termografia infravermelha na determinação do coeficiente de transmissão térmica de soluções construtivas. Para aplicação desta técnica, é indispensável o conhecimento dos fenómenos de transferência de calor que ocorrem. Assim, no presente capítulo é efetuada uma breve descrição do problema, resumo dos fenómenos de transferência de calor e enquadramento da técnica da termografia infravermelha.

Ainda neste capítulo são apresentados os métodos possíveis para a determinação do coeficiente de transmissão térmica (por aplicação da técnica da termografia infravermelha, recurso a medidores de fluxos de calor e cálculo através da ISO 6946:2007).

2.1 Fenómenos de transmissão de calor

Considere-se um sistema composto por uma camada Meio (1), plana e homogénea, com uma extensão infinita (segundo a direção x e z), como ilustrado na figura 2.1.1. Este sistema é confinado por duas camadas de ar (Meio (0) e Meio (2)). Assumindo que o Meio (0) (em contacto com a superfície interior) apresenta uma temperatura, θ_i , constante e mais alta e constante que o Meio (2) (em contacto com a superfície exterior e com uma temperatura constante, designada por θ_e). Desta forma, o fluxo de calor ocorre a partir do Meio (0) para o Meio (2). Assim, o sistema encontra-se em regime de transferência de calor permanente. Existindo conservação de energia é possível afirmar que o fluxo entre a superfície interior e exterior do elemento em análise é igual ao fluxo estabelecido entre os dois ambientes.

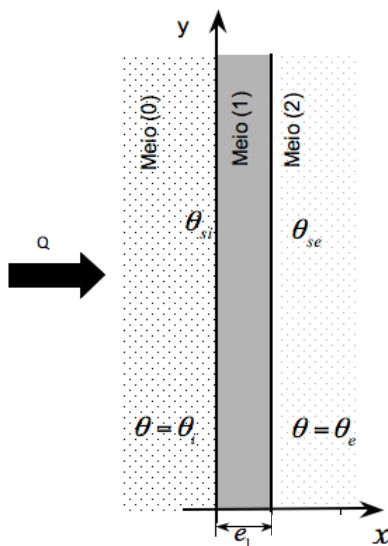


Figura 2.1.1 – Esquema da geometria do problema de um sistema composto por uma camada homogénea plana, em regime permanente de transferência de calor.

Para avaliação da distribuição de temperaturas nas camadas e avaliação do fluxo de calor unidimensional, recorre-se à expressão do balanço energético, dado por:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

Por integração da expressão em função da temperatura, obtém-se:

$$\theta(x) = C_1x + C_2 \quad (2)$$

$$\theta(x) = \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{e}x + \theta_{si} \quad (3)$$

$$Q = -\lambda A \frac{d\theta}{dx} = -\frac{\lambda}{e} A(\theta_{se} - \theta_{si}) \quad (4)$$

Deste modo, o fluxo de calor por condução entre as superfícies (Q), depende do conhecimento da condutibilidade térmica (λ) dos materiais, a sua espessura (e), a área (A) da superfície em análise e o gradiente térmico estabelecido entre ambientes.

A transferência de calor global entre ambientes depende dos três fenómenos de transferência de calor: condução, convecção e radiação, que ocorrem normalmente em simultâneo, num sistema homogéneo. Contudo, é possível individualizar o seu estudo para melhor percepção da sua importância.

A condução, refere-se à propagação de calor por um corpo sólido, entre dois pontos que apresentam uma diferença de temperatura, sendo regida pela lei de Fourier (equação 4):

A convecção, consiste na forma de transmissão de calor no interior de um fluido. A equação (5) que caracteriza este fenómeno foi proposta por Newton:

$$Q_{CONV} = h_c A(\theta_i - \theta_e) \quad (5)$$

O fluxo de calor devido ao fenómeno de convecção depende do coeficiente de convecção, h_c . Este coeficiente depende da velocidade do vento (Palyvos, 2008).

A radiação é obtida pela lei de Stefan-Boltzmann (equação (6)), sendo influenciada pela temperatura reflectida e da emissividade (ε) da superfície em estudo.

$$Q_{RAD} = \varepsilon \sigma A(\theta_s^4 - \theta_{viz}^4) \quad (6)$$

em que θ_s , corresponde à temperatura do corpo radiante e θ_{viz} , à temperatura do corpo receptor.

Considere-se agora um sistema multicamada, um sistema composto por um conjunto de $(m+1)$ camadas planas e homogéneas, com uma extensão infinita (segundo a direção x e z), como ilustrado na figura 2.1.2. Este sistema é confinado por duas camadas de ar (Meio 0 e Meio $(m+1)$). Assumindo que o Meio 0 (em contacto com a superfície interior) apresenta uma

temperatura, θ_i , mais alta e constante que o Meio (m+1) (em contacto com a superfície exterior e com uma temperatura constante, designada por θ_e). Desta forma o fluxo de calor ocorre a partir do Meio 0 para o Meio (m+1). Assim, o sistema encontra-se em regime de transferência de calor permanente.

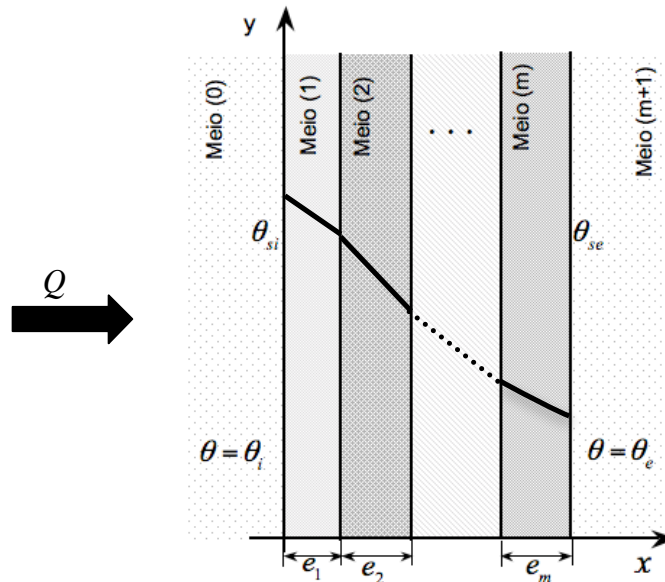


Figura 2.1.2 – Esquema da geometria do problema de um sistema multicamada, em regime permanente de transferência de calor.

Em regime permanente, o fluxo de calor entre os ambientes interior e exterior, dado pela (equação 7), é igual ao fluxo de calor entre a superfície exterior e o ambiente exterior do sistema, (equação 8).

$$Q_x = U(\theta_i - \theta_e) \quad (7)$$

$$Q_x = \frac{1}{R_{se}}(\theta_{se} - \theta_e) \quad (8)$$

onde U, representa o coeficiente de transmissão térmica. Este parâmetro permite quantificar a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente, por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que o elemento separa (REH, 2013). Assim, este parâmetro permite avaliar o desempenho térmico de diferentes soluções construtivas. No presente trabalho, o U é determinado por três métodos:

- Técnica de termografia infravermelha, IRTs;
- Cálculo teórico, segundo a ISO 6946:2007;
- Termofluxímetros, de acordo com ISO 9869:1994;

A IRT é avaliada por comparação dos seus resultados com o valores obtidos de acordo com a ISO 6946:2007 e com os obtidos de acordo com a ISO 9869:1994. De seguida a apresenta-se a IRT, como técnica não destrutiva.

2.2 Técnica de termografia infravermelha

A técnica de termografia infravermelha, consiste num método não-destrutivo, com ausência de contacto, que capta e analisa a radiação infravermelha emitida pelos objetos. Esta radiação é emitida por todos os objetos em quantidade proporcional à quarta potência da temperatura absoluta e à emissividade de cada superfície em estudo. A emissividade hemisférica consiste na relação entre a energia emitida pela superfície de um objecto e a energia de um corpo negro, considerado como um emissor perfeito. As câmaras de termografia captam a radiação emitida pela superfície convertendo-a em sinais eléctricos, criando uma imagem com a distribuição das temperaturas superficiais dos corpos, por aplicação da Lei de Stefan-Boltzmann (Asdrubali *et al*, 2012). A IRT apresenta como principal vantagem a medição de temperatura sem necessitar de contacto. Para além disso, esta técnica permite-nos avaliar extensas áreas num curto período de tempo, e em tempo real.

Esta técnica tem vindo a revelar-se vantajosa em vários domínios da ciência: medicina, medicina veterinária, astronomia, engenharia civil, engenharia mecânica, engenharia aeronáutica, etc.) (Quinteiro, 2009). Mais concretamente, em engenharia civil esta técnica tem vindo a ser utilizada para avaliar o desempenho térmico da envolvente exterior dos edifícios e a detecção de defeitos internos presentes em elementos construtivos (Simões, 2013).

Pela visualização da temperatura superficial nas envolventes, torna-se possível proceder à:

- identificação da estrutura resistente;
- identificação de componentes da solução construtiva: paredes de alvenaria; elementos pré-fabricados em perfil metálico; pontes térmicas lineares;
- identificação de patologias: destacamento de revestimento cerâmico; presença de humidade;
- possibilidade da localização de infiltrações de ar (com auxílio do ensaio de Blower door);
- Identificação de possíveis zonas com risco de ocorrência de condensações.

A técnica de termografia infravermelha carece da existência de um fluxo de calor através do elemento de construção em análise de forma a possibilitar a detecção e/ou avaliação de heterogeneidades na solução construtiva. Estas interferem na propagação da energia térmica pelo elemento de construção, dando origem a distribuição de temperaturas superficiais distintas.

A título de exemplo, são apresentadas nas figuras 2.2.1 e 2.2.2 exemplos de aplicação da técnica na inspeção de edifícios. A primeira apresenta a fotografia digital e o termograma da fachada exterior de um edifício revestido a ladrilho escuro, durante exposição solar. Por análise do termograma é possível observar que os ladrilhos, na vizinhança da janela, não foram aplicados com barramento total, mas sim através de pontos de colagem, apresentando uma temperatura mais baixa (verde). A segunda figura, apresenta fotografia digital e o termograma da fachada de um edifício revestida por tijolo face à vista, num dia enublado. Note-se que no termograma visualiza-se a localização da estrutura resistente - sistema porticado pilar-viga - a uma temperatura mais elevada (branco).

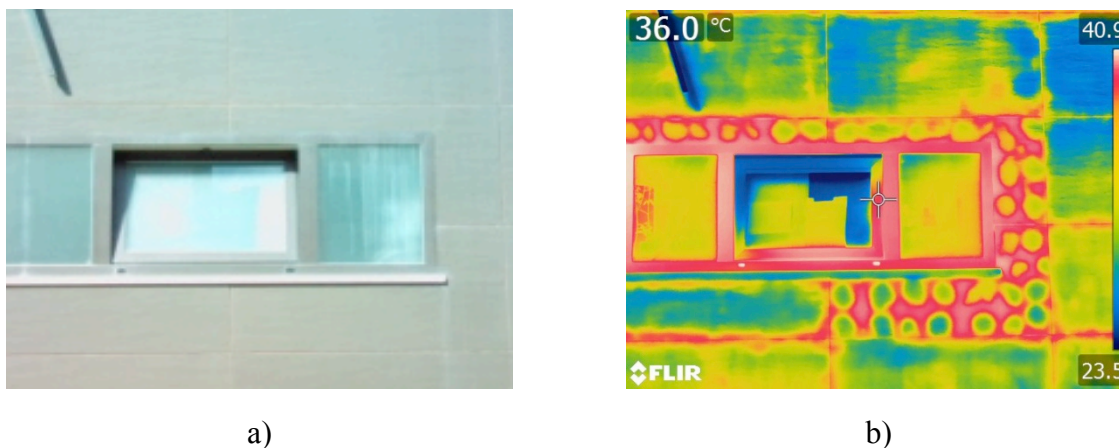


Figura 2.2.1 – Fachada exterior revestida a ladrilho, durante exposição solar: a) fotografia digital; b) termograma em que se identifica o tipo de colagem realizado.

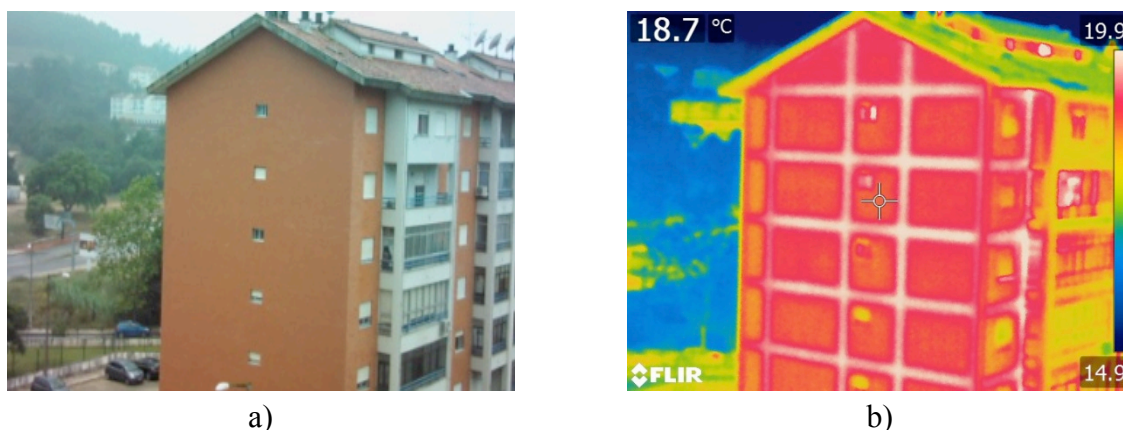


Figura 2.2.2 – Fachada de um edifício: a) fotografia digital; b) termograma com evidência da estrutura resistente.

Deste modo podemos comprovar que a IRT consiste numa técnica não-destrutiva, rápida (Fokaides e Kalogirou, 2011), sem contacto com o elemento em estudo e que possibilita a observação de extensas áreas.

Existem duas abordagens da técnica da IRT passíveis de serem aplicadas: a passiva e a ativa. Na forma passiva o elemento de construção em análise está sujeito a um fluxo de calor obtido de forma natural, por exemplo, devido a aquecimento solar. Quando o fluxo de calor que atravessa as soluções construtivas é resultado da estimulação térmica por meio de fontes artificiais, a IRT define-se como termografia ativa.

Em relação à análise da distribuição superficial de temperatura, esta poderá ser feita, qualitativamente ou quantitativamente. A avaliação qualitativa, é baseada na observação de padrões térmicos, que permitem a detecção de defeitos e anomalias. A análise quantitativa pressupõem a determinação prévia de parâmetros que influenciam a medição por radiação infravermelha, como a humidade relativa, a distância ao objecto, a emissividade da superfície do elemento, a temperatura ambiente e reflectida. Esta análise permite obter temperaturas próximas das reais e avaliar em maior detalhe a anomalia.

Ao longo dos anos, a IRT tem sido mais utilizada em análise qualitativa. Todavia, neste trabalho pretende-se estimar o valor do coeficiente de transmissão térmica em soluções construtivas com recurso à IRT, sendo necessário realizar uma análise quantitativa.

Para aplicação desta técnica, em envolventes de edifícios, existem certas condições que devem ser cumpridas:

- os termogramas devem ser tirados num período de radiação solar incidente mínima (Vollmer e Möllmann, 2010);
- estabilização da temperatura no interior das habitações (Haralambopoulos e Paparsenos, 1996);

- gradiente de temperaturas igual ou superior a 10 °C (Asdrubali *et al*, 2012);
- a velocidade do vento inferior a 1 (m.s⁻¹) (Albaciti e Tonelli, 2010);
- regime permanente, ou quase – permanentes (Albaciti e Tonelli, 2010).

2.3 Determinação do coeficiente de transmissão térmica com recurso à técnica de termografia infravermelha

Com o objetivo de calcular o coeficiente de transmissão térmica, U (W.m⁻².K⁻¹) em soluções construtivas verticais, propõe-se a técnica de termografia infravermelha assumindo a existência de um fluxo de calor em regime permanente,(Hagishima e Tanimoto, 2003).

A termografia infravermelha permite a quantificação da temperatura superficial de soluções construtivas, por conversão da radiação infravermelha emitida por estas. A termografia infravermelha pode ser usada para determinação das temperaturas superficiais, temperaturas ambientes (recorrendo a um cartão, como sugerido por (Vollmer e Möllmann, 2010), temperatura reflectida e emissividade da superfície. Contudo, no presente trabalho, as temperaturas ambientes e temperatura superficial interior é monitorizada com recurso a termopares.

Para a determinação do U , no presente documento, aplicaram-se três formas de cálculo desenvolvidas por (Fokaides e Kalogirou, 2011), (Albaciti e Tonelli, 2010) e (Vollmer e Möllmann, 2010). Nos pontos seguintes apresentam-se as expressões utilizadas por cada um destes trabalhos.

2.3.1 Método proposto por Fokaides e Kalogirou

O trabalho dos autores citados teve como objectivo principal a aplicação da técnica de termografia infravermelha para determinação do coeficiente de transmissão térmica de soluções construtivas opacas da envolvente interior de edifícios. No trabalho é evidente que é imperativo o estudo do efeito da radiação e da convecção.

Apesar deste estudo aplicar a IRT para medição da temperatura superficial interior das paredes, os autores realçam que as medições deverão ser realizadas após 3 a 4 h de ser alcançado um regime de transferência de calor próximo do permanente. Note-se que, neste caso as medições sejam realizadas pelo exterior, estas deverão ser efectuadas sem exposição solar direta.

A determinação do U com recurso à termografia, proposta por estes autores pressupões que a transferência de calor que ocorre entre a superfície da parede e a câmara de termografia resulta da componente da radiação e da componente da convecção, dadas pelas equações (9) e (10):

$$Q_{RAD} = 4\varepsilon\sigma A\theta_{si}^3(\theta_{si} - \theta_{REF}) \quad (9)$$

$$Q_{CONV} = h_c A(\theta_{si} - \theta_i) \quad (10)$$

onde a componente da radiação tem em consideração a emissividade da superfície (ε), σ é a constante de Stefan-Boltzmann, a temperatura superficial interior (θ_{si}) e temperatura reflectida (θ_{REF}). Já a componente da convecção depende do coeficiente de convecção (h_c), da temperatura superficial interior (θ_{si}) da temperatura ambiente interior (θ_i). Como tal, é indispensável determinar a temperatura reflectida e emissividade. A temperatura reflectida pode ser determinada com base na norma ASTM 1862 (1997), enquanto a emissividade pode ser estimada por (ASTM 1862 (1997)). No capítulo 3 serão apresentados mais em pormenor os métodos de determinação destes parâmetros. Por sua vez, o coeficiente de convecção pode ser considerado um dos parâmetros críticos, uma vez que depende da velocidade do vento, (Palyvos, 2008).

Assumindo que a solução construtiva em estudo se encontra sujeito a um regime de transferência de calor permanente e que existe conservação da energia, o fluxo de calor (Q) entre os ambientes separados pela solução (equação (11)) é igual ao fluxo de calor entre a superfície interior e o ambiente interior.

$$Q = UA(\theta_i - \theta_e) \quad (11)$$

onde θ_i e θ_e são, respectivamente, a temperatura interior e temperatura exterior do ambiente, e o U é o coeficiente de transmissão térmica.

Deste modo, o U determinado com recurso à técnica de termografia infravermelha, de acordo com estes autores, é dado pela seguinte relação:

$$U_{LAB} = \frac{4\varepsilon\sigma\theta_{si}^3(\theta_{si} - \theta_{REF}) + h_c(\theta_{si} - \theta_i)}{\theta_i - \theta_e} \quad (12)$$

De forma a aferir a validade dos resultados obtidos a partir da termografia, os autores aplicaram termofluxímetros (International Thermal Instrument (ITI) Company, modelo *No. GHT – 1C (801)*) sobre a superfície. Adicionalmente ainda utilizaram o equipamento da marca *TESTO* modelo *635*, que permite a gravação de temperaturas superficiais, estimando o coeficiente de transmissão térmica das soluções construtivas.

A comparação de resultados revelou erros inferiores a 20 %.

2.3.2 Método proposto por Albaciti e Tonelli

Rossano Albaciti e Arnaldo M. Tonelli apresentam também um trabalho desenvolvido com base na exploração da técnica de termografia infravermelha, com o objectivo de determinar o coeficiente de transmissão térmica. Neste trabalho a termografia infravermelha foi utilizada para determinar a temperatura superficial de soluções construtivas da envolvente exterior de edifícios.

Os autores citados, consideraram, como mencionado anteriormente, que as componentes da radiação e da convecção. Neste estudo, o fluxo de calor associado à componente da convecção, com base Lei de Stefan-Boltzmann, é dado por:

$$Q_{RAD} = \varepsilon\sigma(\theta_{se}^4 - \theta_e^4) \quad (13)$$

onde ε é a emissividade da superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, θ_{se} a temperatura superficial exterior e θ_e a temperatura do ambiente exterior. Note-se que neste caso a temperatura reflectida não é considerada na expressão, podendo-se afirmar, por comparação com a equação (12), que os autores consideram que a temperatura reflectida apresenta um valor próximo da temperatura ambiente.

A parcela da convecção, dada pela equação (14), depende do coeficiente de convecção (h_c), da temperatura superficial exterior (θ_{se}) e da temperatura ambiente exterior (θ_e). Neste caso, o coeficiente de convecção é dado pela equação de Jurges (Watanabe, 1965) (equação (16)). Os autores realçam que para velocidades do vento inferiores a 5 m.s^{-1} a equação é simplificada, desprezando-se o segundo termo.

$$Q_{CONV} = h_c(\theta_{se} - \theta_e) \quad (14)$$

$$h_c = 3.8054v \quad (15)$$

Rossano Albaciti e Arnaldo M. Tonelli definem que o coeficiente de transmissão térmica obtido com recurso à termografia infravermelha (U_{LAB}) pode ser dado por:

$$U_{LAB} = \frac{\varepsilon\sigma(\theta_{se}^4 - \theta_e^4) + 3.8054v(\theta_{se} - \theta_e)}{\theta_i - \theta_e} \quad (16)$$

Como principais dificuldades, os autores identificaram, a determinação da emissividade do elemento em estudo, assim como a medição da velocidade do vento na vizinhança da superfície.

Os autores aplicaram esta técnica em três casos de estudo *in-situ*, em Itália. Os valores obtidos foram comparados com valores obtidos com recurso à medição de fluxos de calor com termofluxímetros. A comparação de resultados evidenciou que os valores obtidos com a IRT apresenta um taxa de erro de 30 %.

2.3.3 Método proposto por Vollmer e Möllmann

M. Vollmer e K. P. Möllmann são outro exemplo na bibliografia que aplicam a IRT para determinação da resistência térmica de soluções construtivas. A resistência térmica pode ser definida como o inverso do coeficiente de transmissão térmica da solução, considerando o gradiente térmico entre o ambiente interior e exterior:

$$R = \frac{1}{U} = \frac{A\Delta\theta_{i-e}}{Q} \quad (17)$$

Tal como nos casos anteriores, M. Vollmer e K. P. Möllmann consideram a componente associada à radiação e à convecção. A componente da radiação é dada por:

$$Q_{RAD} = \varepsilon\sigma A(\theta_{si}^4 - \theta_{REF}^4) \quad (18)$$

onde ε é a emissividade da superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, θ_{si} a temperatura superficial interior e θ_{REF} a temperatura do reflectida. Os autores sugerem que esta expressão possa ser simplificada, uma vez que o valor da temperatura superficial interior é semelhante ao valor da temperatura do ambiente interior e esta, por sua vez, é semelhante ao valor da temperatura reflectida, (Vollmer e Möllmann, 2010). Deste modo, a componente da radiação é dada pela equação (20)

$$Q_{RAD} = 4\varepsilon\sigma A\theta_{mean}^3 (\theta_{si} - \theta_{REF}), \quad (19)$$

na qual θ_{mean} representa a média entre a temperatura superficial interior e a temperatura reflectida.

A componente do fluxo relativa à parcela da convecção é expressa pela seguinte equação:

$$Q_{CONV} = h_c A (\theta_i - \theta_{si}) \quad (20)$$

onde h_c é o coeficiente de convecção, θ_i a temperatura ambiente interior e θ_{si} a temperatura superficial interior. Os autores consideram que os valores típicos do coeficiente de convecção, variam entre 2 a 8 ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

A resistência térmica, tendo em conta o efeito da radiação e da convecção, espaço é então dada por:

$$\frac{1}{U_{LAB}} = \frac{\theta_i - \theta_e}{4\varepsilon\sigma\theta_{mean}^3 (\theta_{si} - \theta_{REF}) + h_c (\theta_i - \theta_{si})} \quad (21)$$

Também neste caso existe a necessidade de determinar a emissividade (conforme procedimento descrito na norma ASTM 1933 (1999) e a temperatura reflectida (pela norma ASTM 1862 (1997))).

2.3.4 Métodos adaptados ao problema

No presente trabalho foram efectuadas medições da temperatura superficial, temperatura reflectida e emissividade com recurso a uma câmara de termografia infravermelha. Posteriormente o coeficiente de transmissão térmica das soluções construtivas estudadas foi determinado com base no métodos expostos anteriormente. Contudo, cada autor considerou equações adaptadas ao seus casos de estudo (medição da temperatura superficial interior versus temperatura superficial exterior). Como tal, foi necessário explorar se a sua aplicação direta seria possível, uma vez que neste trabalho só se pretende aplicar a técnica de termografia pelo exterior. Na figura 2.3.4.1 apresenta-se um esquema que traduz as equações (12), (16) e (21).

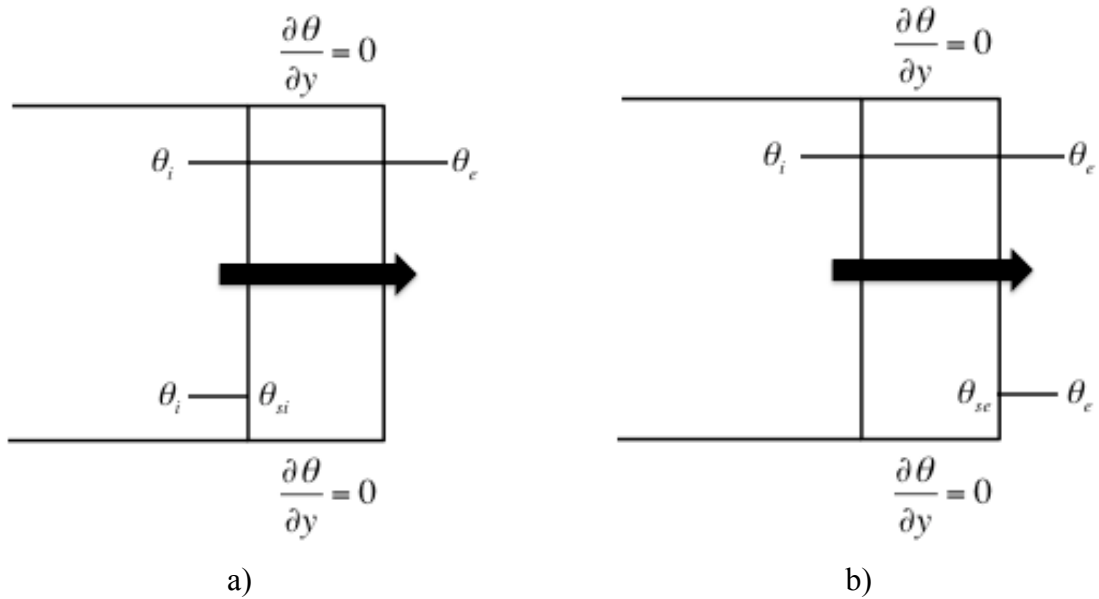


Figura 2.3.4.1 – Ilustração da avaliação da transferência de calor apresentada pelas expressões para cálculo do coeficiente de transmissão térmica consideradas pelos diferentes autores: a) Eq.(12) e Eq.(21); b) Eq.(16).

Como referido, neste trabalho pretende-se determinar o coeficiente de transmissão térmica com recurso a IRT, por medição da temperatura superficial exterior da solução construtiva. Verifica-se que só uma das equações pode ser aplicada directamente ao nosso problema. Desta forma tornou-se imperativo proceder a algumas modificações, a nível das equações (12) e (21), de forma a aplicar o sistema definido na figura 2.3.2 b), obtendo-se:

$$U_{LAB} = \frac{4\varepsilon\sigma\theta_{se}^3(\theta_{se} - \theta_{REF}) + h_c(\theta_{se} - \theta_e)}{\theta_i - \theta_e} \quad (22)$$

$$U_{LAB} = \frac{4\varepsilon\sigma\theta_{mean}^3(\theta_{se} - \theta_{REF}) + h_c(\theta_{se} - \theta_e)}{\theta_i - \theta_e} \quad (23)$$

Uma vez que os três métodos consideram o coeficiente de convecção, no decorrer deste estudo assumiu-se a uniformização do mesmo, utilizando a expressão (15), definida por Jurges (Watanabe, 1965).

No presente trabalho, a IRT foi utilizada para determinar a temperatura superficial da solução construtiva, a emissividade de superfície e a temperatura reflectida. As restantes temperaturas (temperatura superficial interior, temperatura ambiente interior e temperatura

ambiente exterior) foram monitorizadas com termopares. O coeficiente de transmissão térmica foi determinado com base nos métodos apresentados, através da aplicação das expressões (16), (22) e (23).

Com o objectivo de avaliar a aplicabilidade da técnica, os valores obtidos com recurso à IRT foram comparados com valores teóricos (calculados de acordo com a ISO 6946:2007) e os resultados obtidos com a utilização de sensores de temperatura e de fluxo de calor (termofluxímetros). Nos pontos seguintes, descrevem-se estes dois métodos.

2.4 Método teórico para cálculo do coeficiente de transmissão térmico

Um dos métodos para estimar o coeficiente de transmissão térmico, consiste na aplicação da norma ISO 6946:2007. A fórmula que permite aferir o valor deste parâmetro num sistema construtivo de uma camada ou mais, é a seguinte:

$$U_t = \frac{1}{R_{si} + \sum_j^m \frac{e_j}{\lambda_j} + R_{se}}, \quad (24)$$

onde R_{si} e R_{se} representam, respetivamente, as resistências superficiais interiores e exteriores, e R_j a resistência térmica da camada j . Assim, o valor de U é obtido através do conhecimento da resistência térmica de cada elemento construtivo do sistema em análise e das resistências superficiais. De acordo com a ISO 6946:2007, a resistência térmica de uma solução construtiva, sujeita a uma regime de transferência de calor em regime permanente, composta por materiais homogéneos, depende do coeficiente de condutibilidade térmica dos materiais (λ) que a compõe e da espessura de cada material (e). O cálculo da resistência térmica para m camadas homogéneas é dado por:

$$\sum_{j=1}^m R_j = \sum_{j=1}^m \frac{e_j}{\lambda_j} \quad (25)$$

Importa ainda referir, que para além da resistência térmica dos elementos, o ambiente em contacto com a superfície cria uma resistência adicional. Normalmente a solução construtiva que estamos a caracterizar, representa um elemento que separa dois ambientes, que podem ser classificados de interior e de exterior, consoante o tipo de ambiente em contacto com a superfície. Deste modo vão existir duas resistências superficiais, com

características de interior, R_{si} e de exterior, R_{se} . A resistência superficial traduz os fenómenos de radiação e convecção que ocorrem próximo da superfície do elemento em estudo.

Segundo o anexo A, da norma ISO 6946:2007, o cálculo das resistências superficiais, em soluções constructivas planas e homogéneas, é dado por:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (26)$$

onde h_c é o coeficiente de convecção e h_r o coeficiente de convecção. Estes coeficientes dependem das características do ambiente em contacto com o elemento em análise. Considerando um ambiente com características de interior, em que a velocidade do vento é de aproximadamente zero, podemos definir o valor do coeficiente de convecção como constante, assumindo os valores apresentados no seguinte quadro 2.4.1:

Quadro 2.4.1 – Coeficiente de convecção em espaço interior.

Coeficiente de convecção interior (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Direção e sentido do fluxo de calor		
	Ascendente	Horizontal	Descendente
h_{ci}	5.0	2.5	0.7

Contudo no caso da resistência superficial exterior é necessário calcular o coeficiente de convecção exterior (h_{ce}), sendo indispensável a medição da velocidade do vento incidente.

$$h_{ce} = 4 + 4v \quad (27)$$

Nas expressões (17), (23) e (24) o coeficiente de convecção é obtido pela equação definida por Jurges (equação (16)) (Watanabe, 1965).

De forma a uniformizar o coeficiente de convecção utilizado no cálculo do coeficiente de transmissão térmico teórico e experimental, constatou-se que este deveria ser determinado de acordo com a equação (16). Como será verificado mais tarde, as superfícies dos provetes de ensaio serão sujeitos a um sistema de ventilação forçada. Deste modo, considera-se que o coeficiente de convecção interior e exterior são determinados de acordo com a expressão equação (16). Portanto:

$$h_{ci} = 3.8054v_i \quad (28)$$

$$h_{ce} = 3.8054v_e \quad (29)$$

onde v_i e v_e são, respectivamente, as velocidades do vento na vizinhança da superfície interior e exterior.

Para estimar a componente da radiação, importa compreender e determinar o coeficiente de radiação, h_r , dado por:

$$h_r = 4\varepsilon\sigma\theta_m^3 \quad (30)$$

Este, varia consoante a análise seja feita para espaço interior ou exterior, devido às temperaturas utilizadas no cálculo de θ_m , que representa a média da temperatura superficial com a temperatura do ambiente em causa. Assim define-se que o coeficiente de radiação correspondente à resistência superficial interior e exterior é, respectivamente, dada pelas equações (33) e (34).

$$h_{ri} = 4\varepsilon\sigma\theta_{mi}^3, \text{ com } \theta_{mi} = \frac{\theta_{si} + \theta_i}{2} \quad (31)$$

$$h_{re} = 4\varepsilon\sigma\theta_{me}^3, \text{ com } \theta_{me} = \frac{\theta_{se}^{TP} + \theta_e}{2} \quad (32)$$

onde θ_{me} resulta da média da temperatura superficial exterior medida através de um termopar, colocado junto à superfície do material com a temperatura do ambiente exterior. Ao utilizarmos, o valor de θ_{se}^{TP} , eliminamos o erro associado à temperatura superficial medida pela câmara de IRT. Desta forma, podemos aferir a validade da aplicação da técnica de termografia infravermelha.

Sintetizando:

$$R_{si} = \frac{1}{h_{ci} + h_{ri}} \quad (33)$$

$$R_{se} = \frac{1}{h_{ce} + h_{re}} \quad (34)$$

2.5 Método do termofluxímetro

O sistema do termofluxímetro, constituído por sensores de fluxo e termopares (figura 2.5.1), consiste num equipamento que permite a medição das temperaturas superficiais e do fluxo de calor. Este equipamento pode ser utilizado, como base de uma técnica não-destrutiva, para determinação da resistência térmica de soluções construtivas. Esta técnica requer o contacto com a superfície plana do sistema em estudo.

A resistência térmica de elementos construtivos pode ser determinado, com recurso ao termofluxímetro, seguindo o procedimento de ensaio estabelecido na norma (ISO 13786:2006). Considerando que o fluxo de calor estabelecido é unidirecional, a resistência térmica da solução construtiva em estudo é dado pelo quociente entre o fluxo de calor monitorizado pela diferença de temperaturas.



Figura 2.5.1 – Termofluxímetro: sensores de fluxo e termopares.

De acordo com a norma de ensaio devem existir alguns cuidados na sua aplicação:

- os sensores devem ser colocados de forma a representarem todo o elemento;
- devem ser evitadas zonas em que o fluxo de calor não é unidirecional. Por este motivo os sensores devem ser instalados afastados de pontes térmicas (por exemplo, zonas próximas de cantos, próximos de vão, etc.);
- a superfície exterior, deve ser protegida contra as condições climatéricas, nomeadamente incidência direta de radiação solar e precipitação e rajadas de vento (Albaciti e Tonelli, (2010);

A medição de fluxos de calor de acordo com a norma (ISO 13786:2006) é uma técnica demorada, uma vez que a duração mínima de ensaio é de 72 h, tendo em conta que a temperatura entre ambientes se mantém constante. Assim é condicionado pelas características do elemento construtivo, pela variação de temperatura e pelo método aplicado posteriormente para análise dos dados recolhidos.

Perante as três técnicas apresentadas para determinação do coeficiente de transmissão térmica, tornou-se importante avaliar determinados parâmetros e a sua influencia nas medições de radiação infravermelha. Deste modo, procedeu-se ao estudo da temperatura reflectida, da temperatura superficial medida e da velocidade do vento. As considerações sobre estes parâmetros são apresentadas de seguida.

3 PARÂMETROS QUE AFECTAM A APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA NA DETERMINAÇÃO DE U

Para aplicação das expressões definidas por (Fokaides e Kalogirou, 2010), (Albaciti e Tonelli, 2010) e (Vollmer e Möllmann, 2010), tornou-se imperativo o conhecimento de determinados parâmetros que compõem as equações apresentadas no capítulo anterior. A sua incorreta determinação e compreensão poderá culminar em resultados pouco fiáveis, que não representam a realidade.

Durante os ensaios laboratoriais preliminares, tornou-se evidente que seria necessário avaliar a influência de cada um dos seguintes parâmetros individualmente: a temperatura superficial, a temperatura reflectida, a emissividade e a velocidade do vento. Cada um deles, encontra-se inserido no cálculo do coeficiente de transmissão de calor, influenciando as componentes de radiação e/ou convecção.

3.1 Temperatura superficial

A distribuição de temperatura na superfície de um edifício varia por ação de diversos factores: alterações climatéricas, emissividade, tipo de cor da superfície (Monteiro e Leder, 2011), radiação solar incidente e velocidade do vento, variáveis de acordo com a estação do ano. A temperatura superficial de um objecto pode ser estimada com recurso à técnica de termografia infravermelha.

Aquela técnica, como já mencionado, baseia-se na radiação infravermelha emitida pelo corpo em estudo. Esta radiação pode ser convertida em temperatura superficial por aplicação da lei de Stefan–Boltzmann. É importante compreender que a radiação captada pela câmara não depende apenas da energia radiação emitida pelo corpo, mas também da radiação reflectida pelo ambiente e corpos vizinhos ao corpo. A transmissão da energia emitida entre o objecto e a câmara é influenciada pela atmosfera, como ilustrado na figura 3.2.1. (Hoyano *et al*, 1999). De forma a eliminar os efeitos da radiação emitida pelos corpos vizinhos, como por exemplo equipamentos, estes podem ser cobertos por papel mate, de forma a uniformizar a temperatura superficial (Dufour *et al*, 2009).

Da análise da figura 3.2.1 conclui-se que a temperatura superficial real de um elemento construtivo, medida através da câmara de termografia infravermelha, é influenciada por alguns parâmetros de calibração, como a emissividade, a humidade relativa do ar, distância ao objecto, temperatura reflectida e temperatura ambiente. Assim importa

compreender de que forma se obtêm. Através da figura (3.1.1), torna-se perceptível que o sensor térmico é influenciado pela energia: emitida pelo objecto, como pela do ambiente. De igual modo, a energia reflectida do objecto e da atmosfera são captadas, podendo alterar a temperatura superficial medida pela câmara de IRT.

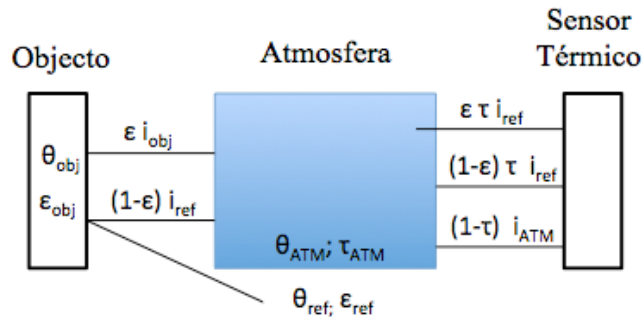


Figura 3.1.1 – Influência da radiação emitida pelo objecto e pela atmosfera na leitura efectuada pelo sensor térmico, adaptado de (Fokaides e Kalogirou, 2011).

A temperatura ambiente e a humidade relativa podem ser determinado através de um termohigrómetro. A temperatura ambiente, varia consoante o local e a estação do ano. Em ambiente laboratorial torna-se possível controlar o seu valor, podendo variar entre $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, enquanto a humidade relativa encontra-se normalmente entre $(50 \pm 5) \%$. No ambiente exterior a humidade relativa pode chegar até os 100 %, em casos de precipitação. Posteriormente poderemos verificar qual a variação necessária para que os seus valores influenciem significativamente a temperatura superficial.

A distância da câmara de IRT à solução construtiva em análise constitui uma variável importante, devido aos efeitos dos fenómenos de convecção e radiação, que variam de acordo com a distância. Assim, caso a distância seja aproximadamente 1.5 m, podemos assegurar que a temperatura superficial medida, corresponde à radiação emitida pela solução construtiva. Contudo, para distâncias superiores, tem-se verificado que este parâmetro é bastante relevante, visto que influencia as medições realizadas. Deste modo, conclui-se que a distância influencia radiação medida, podendo não corresponder à pretendida, envolvendo a presença de outros fenómenos, podendo incurrir um erro no resultado final.

Os parâmetros emissividade e temperatura reflectida serão analisados nos pontos seguintes.

3.2 Emissividade superficial

Como mencionado anteriormente, a termografia infravermelha permite estimar a temperatura superficial de objetos por medição da radiação infravermelha, uma vez que esta é proporcional à quarta potência da referida temperatura e da emissividade. A emissividade é uma propriedade da superfície que demonstra a capacidade do material emitir energia em comparação com um corpo negro ideal, à mesma temperatura e com uma emissividade igual a um (Avdelidis e Moropoulou, 2003).

Esta variável tem um papel importante para a aplicação de IRT em edifícios, sendo dependente do tipo de material, textura da superfície, ângulo de visão, comprimento de onda (Avdelidis e Moropoulou, 2003) e temperatura.

Os materiais de construção, normalmente apresentam um valor de emissividade elevada (Monteiro e Leder, 2011), tal como determinado em cada uma das soluções construtivas em análise, em que o seu valor varia de 0.93 - 0.97, o que minimiza os erros de medição de temperatura superficial. Uma superfície com emissividade baixa, atua basicamente como um espelho (Avdelidis e Moropoulou, 2003).

Para determinação indireta da emissividade poderá seguir-se a norma ASTM 1933 (1999). É obtida através de uma medição paralela da temperatura superficial com outros instrumentos ou utilizando fitas com emissividade conhecida, aplicada sobre a superfície. Quando a superfície que servirá de comparação e o nosso objecto/superfície de estudo se encontrar em equilíbrio térmico com o meio envolvente, deverá ser introduzida na câmara a emissividade da superfície de comparação (emissividade conhecida à priori), a temperatura e humidade relativa do ambiente e a distância ao objecto (Avdelidis e Moropoulou, 2003). Por sua vez, a temperatura reflectida, deverá ser considerada igual a zero. Fixando um ponto sobre a superfície da superfície de comparação, deve-se registar a sua temperatura (T_1). Fixando outro ponto à mesma cota, na superfície em estudo, terá de se variar unicamente o valor da emissividade de forma a que este ponto tenha um valor de temperatura igual a T_1 . Deste modo, podemos saber qual a emissividade da superfície de cada solução construtiva.

Vários autores têm trabalho no estudo da emissividade. Destaca-se:

- (Hansman Jr., 1995) propôs uma técnica de determinação da emissividade com a intenção de evitar erros que são devidos à absorção e à reflexão;
- (Avdelidis e Moropoulou, 2001) determinaram a emissividade de diferentes materiais, sujeitos a diferentes, temperaturas e comprimentos de onda.

Por meio de uma análise de sensibilidade, foi possível observar como a emissividade implica a variação de forma dinâmica da temperatura superficial das soluções construtivas em análise (Barreira e Freitas, 2007).

3.3 Temperatura reflectida

Assim, a temperatura obtida pela técnica de termografia infravermelha é equivalente à temperatura radiante, não correspondendo à temperatura real, (Hoyano *et al*, 1999). Como já mencionado, de forma a obter-se o valor da temperatura superficial correto, deve-se proceder à sua correção. Como já referido, um dos factores correctivos a utilizar corresponde à temperatura reflectida. Este parâmetro permite a compensação da radiação emitida pela solução construtiva e pelo ambiente envolvente (Monteiro e Leder, 2011).

Outros autores referem que pode ser efectuado um ajuste simplificado para determinação da temperatura reflectida, considerando-a igual à temperatura ambiente (Albaciti e Tonelli, 2010).

Já outros autores, indicam que caso seja relevante que o valor da temperatura superficial do objecto seja o mais próxima da realidade possível, a correção aplicada à radiação infravermelha captada pela câmara de IRT, deva ser efectuada com a temperatura reflectida real (Dufour *et al*, 2009).

Para determinação da temperatura reflectida pode-se aplicar o procedimento sugerido na norma ASTM 1862 (1997). Resumidamente, um dos métodos utilizados, consiste na aplicação de uma folha de alumínio (Dufour *et al*, 2009), como ilustrado na figura (3.3.1), engelhada, colocada sobre a superfície, de forma complanar a esta. A folha de alumínio é considerada como um “corpo” perfeitamente emissor, uma vez que apresenta emissividade igual a 1.00 (Monteiro e Leder, 2011). O termograma gerado, considerando emissividade igual a 1 e a distância ao objecto igual a zero, fornece a temperatura reflectida (igual à média de temperaturas na área central da folha de alumínio). A temperatura reflectida obtida está directamente relacionada com a radiação emitida pelas fontes de calor presentes no local de medição (Asdrubali *et al*, 2012).

Esta variável, só deverá ser determinada, quando o sistema de ensaio, atingiu o regime permanente (Dufour *et al*, 2009). No caso de estudo que se apresenta de seguida, a temperatura reflectida foi sempre obtida em instantes anteriores à medição final.

Este parâmetro é particularmente importante, uma vez que nos permite obter de forma mais correcta o valor da temperatura superficial, medida pela câmara de IRT.

Note-se que, apesar da temperatura reflectida ser relevante para a determinação da temperatura superficial real do objecto, no presente trabalho não se aplicou na máquina qualquer correção associada à temperatura reflectida. Esta situação deveu-se ao facto de as equações utilizadas para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica já incluírem os efeitos da temperatura reflectida.

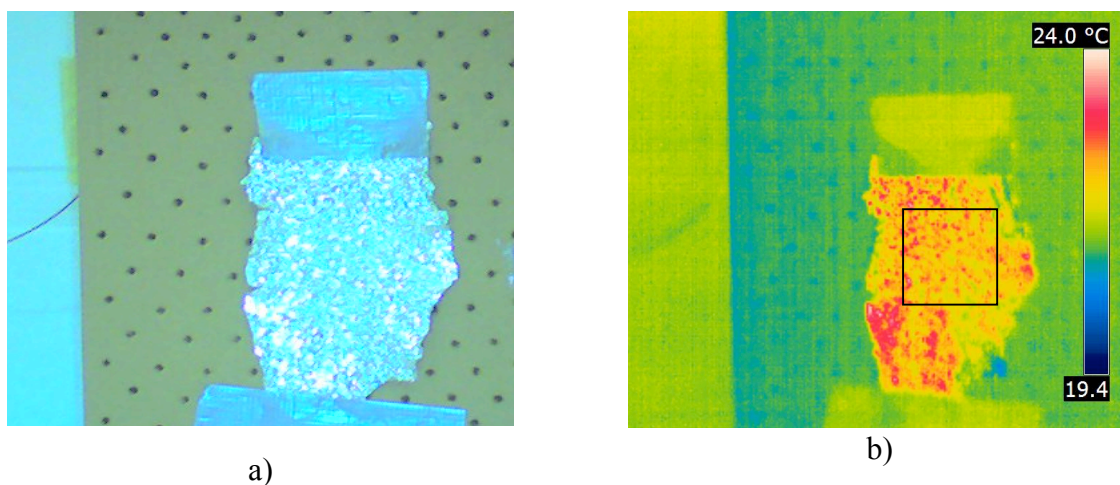


Figura 3.3.1 – Medição da temperatura reflectida através da câmara de termografia infravermelha com recurso a papel de alumínio: a) fotografia digital; b) termograma gerado com marcação da área de medição da temperatura reflectida.

3.4 Velocidade do vento

A velocidade do vento é uma variável muito importante, uma vez que consiste na única variável do coeficiente de convecção, segundo a equação (15). Lembra-se que este coeficiente é relevante para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica (equações (16), (22) e (23)), com recurso à IRT, e para a determinação do mesmo coeficiente de acordo com a ISO 6946:2007 (equação (22)).

Dada a relevância deste parâmetro, (Hagishima e Tanimoto, 2003) realizaram um estudo para compreensão da relação do coeficiente de convecção com a velocidade do vento, tendo chegado a duas conclusões:

- a velocidade do vento varia segundo cada tipo de estudo e investigador;
- a velocidade do vento varia consoante a distância à solução construtiva.

Neste trabalho quantificou-se a velocidade do vento junto às superfícies interior e exterior dos materiais construtivos, através da medição com um anemómetro.

Rapidamente, podemos verificar, que caso o seu valor seja igual a 0 m.s^{-1} conduziria a um fluxo de calor por convecção nulo. Contudo, neste estudo, é conveniente que o seu valor não exceda 1 m.s^{-1} , uma vez que provocaria dificuldade ao nível da convecção (Albaciti e Tonelli, 2010).

No próximo capítulo apresentam-se os casos de estudo e resultados obtidos na campanha laboratorial. Posteriormente será apresentada uma análise de sensibilidade de forma a revelar o impacto de cada uma destas componentes no cálculo do coeficiente de transmissão térmica

4 CASOS DE ESTUDO DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

4.1 Caixa de Ensaio

Com o objectivo de ser avaliada a aplicação da técnica de termografia infravermelha na determinação do coeficiente de transmissão térmica, foi realizada uma série de ensaios laboratoriais. Para tal foi construído um provete de $0.5 \text{ m} \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$, constituído por quatro paredes com materiais diferentes: MDF (*medium density fiberboard*); XPS (poliestireno extrudido); CBPB (painel composto por uma mistura de partículas de madeira e cimento); NC (Cortiça Natural). Cada um destes materiais possuía uma espessura de aproximadamente 20 mm. Foram ainda aplicadas duas placas, com aproximadamente 80 mm de espessura, de XPS, no topo e na base da caixa (figura 4.1.1), de modo a garantir que o fluxo de calor que as atravessa pelo topo e pela base é diminuto. Apenas os materiais que constituíam as faces laterais da caixa foram estudados.

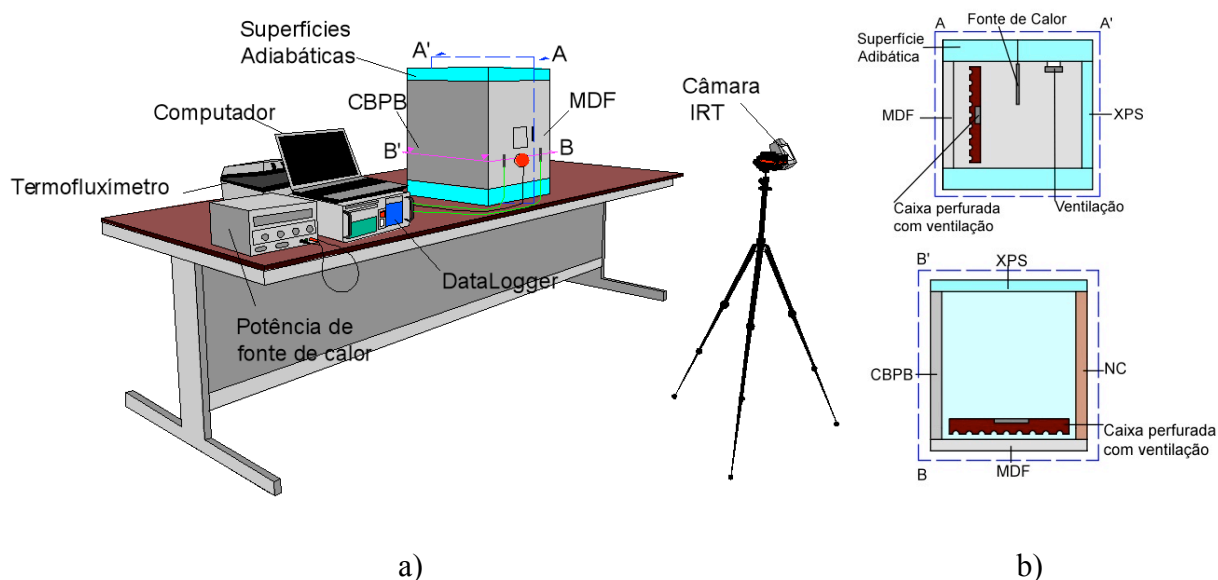


Figura 4.1.1 – Sistema da caixa de ensaio: a) sistema composto pela câmara de termografia infravermelha, fonte de calor, computador, data logger e termofluxímetro; b) provete de ensaio : visualização do interior segundo o corte AA', em planta para visualização da distribuição dos materiais utilizados, segundo o corte BB'.

Previamente para a construção do provete, as soluções construtivas utilizadas foram caracterizadas pela determinação do seu coeficiente de condutibilidade térmica e da sua espessura. A sua espessura foi determinada de acordo com a norma EN 823:2013. A condutibilidade térmica foi obtida através do Método do *Guarded Hot – Plate* (ISO 8302:1991), *Lambda-Mebtechnik GmbH Dresden*, modelo *Single Specimen Lambda – meter EP-500*, seguindo o procedimento de teste descrito na EN 12667:2001.

Apresenta-se no quadro 4.1.1, os valores da espessura e do coeficiente de condutibilidade térmica utilizados neste trabalho. Este apresenta ainda os valores da massa volúmica, o calor específico e o coeficiente de difusidade térmica, apresentados na tese de doutoramento (Simões, 2013). Relembra-se que o coeficiente de difusidade térmica é dado pela razão entre o coeficiente de condutibilidade térmica e o produto da massa volúmica pelo calor específico.

Deste conjunto de soluções construtivas utilizadas, unicamente dois deles são considerados isolamentos térmicos, o XPS e o NC, uma vez que a sua condutibilidade térmica é inferior a $0.065 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$ (LNEC, 2006). O MDF e o CBPB são assim considerados materiais não isolantes.

Quadro 4.1.1 – Apresentação das características geométrica e térmicas de cada material: espessura, coeficiente de condutibilidade térmica, massa volúmica, calor específico e coeficiente de difusidade térmica.

Material	Espessura (mm)	Coeficiente de condutibilidade térmica λ , ($\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$)	Massa Volúmica ρ , (kg.m^{-3})	Calor específico, c ($\text{J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$)	Coeficiente de difusividade térmica, K ($\text{m}^2\text{.s}^{-1}$)
MDF	18.17	0.120	600.00	1700.00	1.18e-07
XPS	20.00	0.039	35.00	1400.00	7.14e-07
CBPB	18.33	0.220	1200.00	1500.00	1.22e-07
NC	20.60	0.047	130.00	1638.00	2.16e-07

O ensaios foram realizados num ambiente laboratorial controlado, a uma temperatura ambiente de $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $(50 \pm 5) \%$.

Idealmente, para utilização da técnica de termografia infravermelha, é necessário criar um gradiente térmico superior a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (Asdrubali *et al*, 2012). Assim instalou-se no interior da caixa uma fonte de calor, de modo a originar uma transferência de calor do interior para o exterior desta. As medições por IRT só foram realizadas após estar garantido o regime de calor permanente. O calor gerado no interior da caixa foi regulado através de um controlador

da potência da fonte de calor instalada no interior da caixa. A uniformização de temperaturas superficiais revelou-se um desafio nos ensaios iniciais.

A campanha laboratorial foi iniciada em Outubro de 2013. Pela técnica de termografia infravermelha, constatou-se através dos termogramas dos primeiros ensaios, que a temperatura superficial exterior não era uniforme. Na figura 4.1.2, apresentam-se dois termogramas que caracterizam a superfície exterior de um material (MDF).

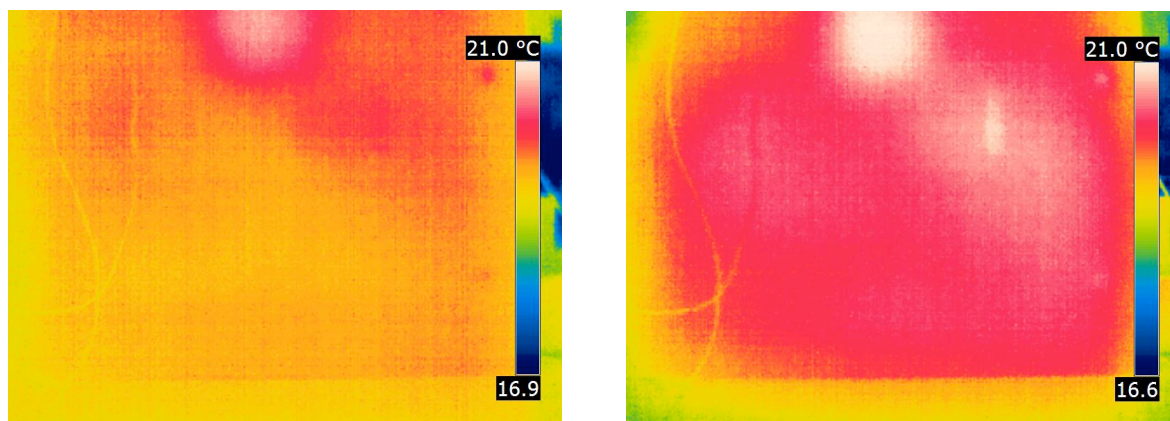


Figura 4.1.2 – Termogramas obtidos no início da campanha laboratorial que revelam a distribuição não uniforme de temperatura – MDF.

Na figura 4.1.2, no termograma da esquerda, é evidente a estratificação das temperaturas: na base da figura as temperaturas são mais baixas do que no topo. No topo identifica-se ainda uma zona quente (cor branca), correspondente à localização da fonte de calor.

Para evitar este problema, instalou-se um sistema de ventilação no interior da caixa (figura 4.1.3) composto por uma caixa perfurada, que com auxílio de ventoinhas proporcionassem o efeito pretendido de forma eficaz. Com esta solução conseguiu-se uma distribuição uniforme de temperatura (figura 4.1.4).

As medições de temperatura superficial exterior foram realizadas por uma câmara de termografia da *FLIR*, modelo *T360*. A monitorização das restantes temperaturas (superficial interior, ambiente interior e ambiente exterior) foi efectuada com recurso a 8 termopares do tipo K (constituído por fios de 0.2 mm), calibrados anteriormente por um laboratório acreditado. Os valores foram gravados, em intervalos de 10 s, por um sistema de aquisição de dados da marca e modelo *Yokogawa MW 100*. Três termopares foram instalados no interior da caixa para aferir a temperatura ambiente, um na superfície interior, dois no exterior para medição da temperatura ambiente exterior e um na superficial exterior. Este último possuía como objectivo a confirmação de o provete se encontrar em regime permanente. A humidade

relativa do ar foi medida e registada com um termohigrómetro da *Hygrolog HL-NT2-DP* da *Rotronic*. A medição da velocidade do vento foi realizada com recurso a um anemómetro *Kestrel*, modelo *4500*. No interior o valor obtido foi de 0.3 m.s^{-1} , enquanto no exterior foi de 0.4 m.s^{-1} .

Foi ainda instalado um termofluxímetro da marca *Hukseflux*, composto por dois sensores de fluxo e quatro termopares. Este foi aplicado para aferir a validade dos resultados obtidos pela IRT, em comparação com o valor teórico do coeficiente de transmissão térmica obtido para cada solução construtiva em análise.

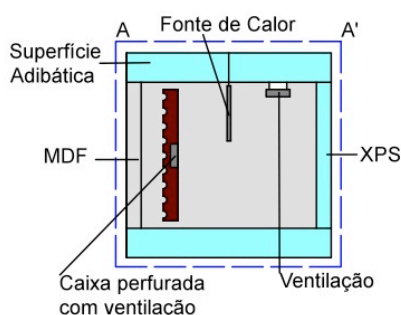


Figura 4.1.3 – Visualização da localização do sistema de ventilação, segundo o corte AA'.

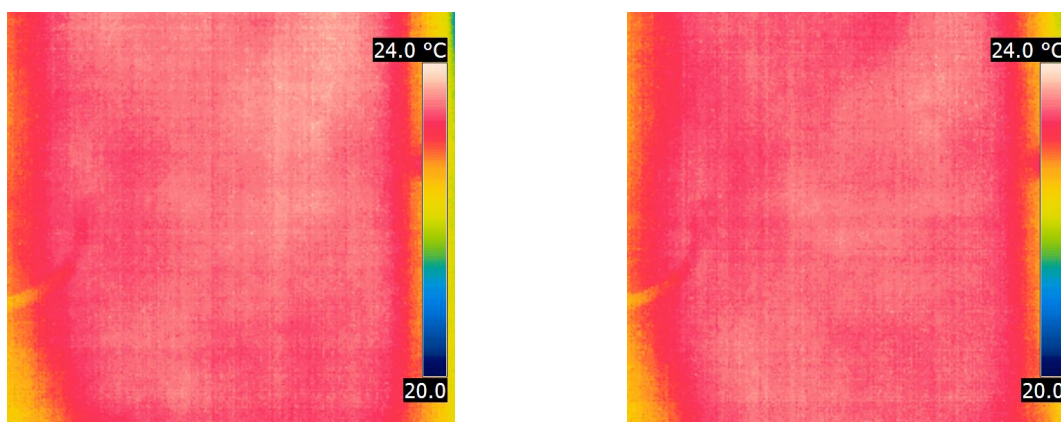


Figura 4.1.4 – Termogramas da superfície exterior da placa de MDF evidenciando uma distribuição uniforme de temperatura.

Para aplicação das equações (16), (22) e (23), é essencial determinar alguns parâmetros variáveis, que dependem de medições efetuadas a partir da câmara de IRT, podendo existir erros associados ao valor obtido. Isto é, a emissividade e a temperatura reflectida. Estes parâmetros foram determinados de acordo com os procedimentos estabelecidos nas normas (ASTM 1933 (1999)) e (ASTM 1862 (1997)), respectivamente.

Para determinação da emissividade, a superfície de comparação foi uma fita adesiva preta de emissividade conhecida. Esta foi colocada na superfície exterior do provete no início do ensaio, para adaptação à temperatura superficial do material. Ao ser atingido o regime permanente, determinou-se o valor da emissividade do material estudado, como descrito no ponto 3.2.. No quadro 4.1.2 apresentam-se os resultados obtidos para cada material.

Para obtenção da temperatura reflectida, foi aplicada uma folha de papel de alumínio rectangular sobre a superfície em estudo, com planar a esta, como descrito no ponto 3.3.

Quadro 4.1.2 – Emissividade determinada de acordo com a ASTM 1933 (1999) de cada solução construtiva.

Material	ε (-)
MDF	0.94
XPS	0.96
CBPB	0.96
NC	0.95

Após a análise de uma sistema de camada simples, procedeu-se ao estudo de sistema multicamada, constituída por 37 mm de XPS, 4 mm de cortiça natural (NC) e 4 mm de ladrilho cerâmico. A condutibilidade térmica do XPS e do NC, encontra-se exposta no quadro 4.1.1. O ladrilho cerâmico apresenta uma condutibilidade de $0.055 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

4.2 Hot-Box

A Hot-Box permite o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$), de provetes laboratoriais (por exemplo, janelas e paredes), por aplicação da norma ISO 12567-1. Uma das vantagens deste equipamento é permitir estimar o U de soluções construtivas heterogéneas.

Este equipamento é constituído por duas câmaras, que permitem simular, características de um ambiente quente e frio, figura 4.2.1. De igual modo, consegue isolar a zona de ensaio, do espaço envolvente. Os dois ambientes são separados pelo provete. Para colocação do provete, utiliza-se um aro metálico que se instala entre as duas câmaras. As câmaras e o aro metálico, são de fácil movimentação, podendo ser movidos e desacoplados, uns dos outros, facilitando o processo de montagem do provete. O painel onde é colocado o provete para análise, consiste numa parede de alta resistência térmica, permitindo a separação entre ambientes, quente e frio. Este, designado como painel envolvente, é composto por 120 mm de espessura de EPS. A condutibilidade térmica deste material é de $0.037 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$. É possível aceder a cada uma das câmaras através de uma porta termicamente eficiente. Estas

contêm duas aberturas nas extremidades para poderem ser acopladas às câmaras climáticas, que permitem definir as características de cada ambiente (temperatura e humidade relativa). As câmaras climáticas, são da marca *Aralab*, modelo *Fitoclima 1000*.

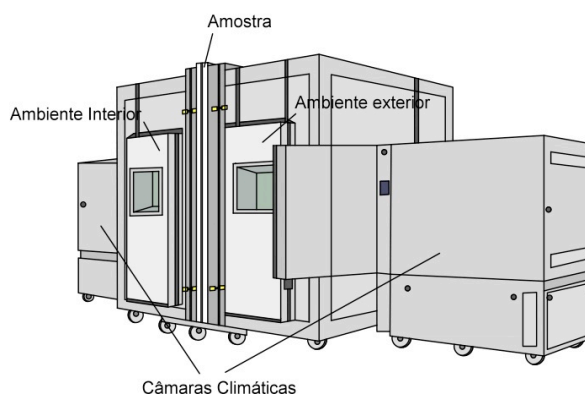


Figura 4.2.1 – Ilustração da Hot-Box.

De igual modo, consegue isolar a zona de ensaio, do espaço envolvente. As paredes das duas câmaras são bastante isoladas de forma a reduzir as perdas de calor para o ambiente exterior. São revestidas por PVC, no exterior e no interior e por aço inox. É possível aceder a cada uma das câmaras através de uma porta termicamente eficiente. Estas contêm duas aberturas nas extremidades para poderem ser acopladas às câmaras climáticas, que permitem controlar uma temperatura no ambiente de ensaio igual à pretendida. As câmaras climáticas, são da marca *Aralab*, modelo *Fitoclima 1000*. Para além da possibilidade de controlo da temperatura do ambiente interior, é permitida a modificação da humidade relativa. Para colocação do provete, existe um aro metálico entre as duas câmaras. As câmaras e o aro metálico, são de fácil movimentação, podendo ser movidos e desacoplados, uns dos outros, facilitando o processo de montagem do provete. O painel onde é colocado o provete para análise, consiste numa parede de alta resistência térmica, permitindo a separação entre ambientes, quente e frio. Este, designado como painel envolvente, deverá ter mais de 100 mm de espessura, ou até a espessura do provete.

Importa referir que, neste tipo de hot-box, existe uma metodologia própria para determinação das resistências superficiais. Para a sua determinação são feitas medições em dois painéis de calibração de propriedades térmicas conhecidas, sendo obtidos os valores dos coeficientes de radiação e de convecção dos dois lados do painel de calibração. Tal como a resistência do painel de calibração. Posteriormente para determinação da resistência térmica de um material, este é colocado na zona de abertura, no painel envolvente, na zona central.

A temperatura do ar, medida na zona interior de ensaio, deve ser determinada com um afastamento específico do painel envolvente e da barreira difusora.

Existe um sistema de ventilação no interior de cada uma das câmaras, tal como um sensor para medição da velocidade do vento. O fenómeno da convecção natural é próprio de espaços fechados, podendo simular-se na hot-box, devida à pequena área interior na zona de ensaio, compreendida entre a placa difusora e o painel de envolvente, onde se encontra o provete. Para que se considere convecção natural no interior das câmaras, controla-se a velocidade do ar a rondar os 0.3 m.s^{-1} .

A placa difusora, conhecida por “baffle”, colocada em cada uma das câmaras, apresenta uma temperatura aproximadamente uniforme. Estas, apresentam um dimensão e uma posição que possibilite a circulação do ar à sua volta (Martins, 2008).

No primeiro ensaio realizado, na abertura central, foi colocada uma janela (figura 4.2.2), em que o sistema se encontra representado esquematicamente pela figura 4.2.3 Pretende-se determinar valor de U ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), numa dada área de vidro e no caixilho, por aplicação da técnica de termografia infravermelha.

O provete em estudo, consiste numa janela de sacada com duas folhas de correr, com 110 mm de espessura. É composta por um vidro Planitherm Ultra N (8 mm), uma caixa de ar com argon (20 mm) e um vidro Laminado Stadip Silence 44.1 (8 mm). As propriedades geométricas e térmicas das áreas de estudo, encontram-se expostas no seguinte quadro.

Quadro 4.2.1 – Resistência térmica de elementos constituintes da janela, o vidro e a caixilharia.

Material	R_t ($\text{m}^2.\text{°C}.\text{W}^{-1}$)
Vidro	0.83
Caixilho	0.49

A câmara quente foi ligada a 45 °C a 18 de Março de 2014, deixando-se desligada a câmara fria, garantindo à partida um gradiente térmico superior a 10 °C .

Posteriormente, assim que o sistema entrou em equilíbrio, a 20 de Março de 2014, foi iniciada a recolha de dados com a câmara de IRT, figura 4.2.4.



Figura 4.2.2 – Janela utilizada em ensaio realizado na Hot-Box: a) Vista geral do provete; b) Pormenor da superfície do caixilho da janela.

No interior das duas câmaras, foi ligado o sistema de ventilação. A velocidade do vento medida através de um anemómetro, da *Kestrel*, modelo 4500, variou entre 0.1 m.s^{-1} e 0.3 m.s^{-1} , garantindo assim uma convecção natural no seu interior.

De forma a compreender a evolução do ensaio, procedeu-se à monitorização do sistema, de manhã, ao meio-dia e ao fim da tarde. Uma vez que a temperatura do ambiente exterior varia ao longo do dia, conseqüentemente, o seu efeito poderia resultar numa alteração da temperatura ambiente, no interior da câmara “fria” (desligada).

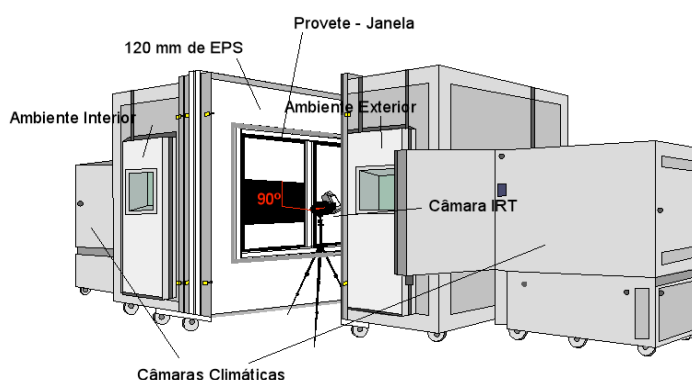


Figura 4.2.3 – Esquema de ensaio da janela, instalada no interior da Hot-Box.

Pretende-se neste ensaio aplicar as expressões (16), (22) e (23), para determinação do coeficiente de transmissão térmica da janela e do caixilho e, posteriormente, proceder à comparação com os resultados teóricos de cada uma das áreas em estudo. Para este efeito, foi

necessário aguardar que todo o sistema se encontra-se em regime de transferência de calor permanente e garantir uma distribuição uniforme de temperatura na superfície.

A medição com recurso à câmara de termografia *FLIR*, modelo *T360*, foi realizada no interior da câmara fria. Foi colocado um termohigrómetro na zona de ensaio da câmara “fria”, de forma a obter os dados relativos à temperatura ambiente e à humidade relativa. Posteriormente, estes foram introduzidos na câmara de termografia para determinação dos seguintes parâmetros: a emissividade, a temperatura reflectida e, por fim, a temperatura superficial do vidro e do caixilho. Também neste caso de estudo, foram aplicadas as normas (ASTM 1933 (1999)) e (ASTM 1862 (1997)) para determinação da emissividade e temperatura reflectida, respectivamente. Para o caixilho, a temperatura reflectida considerou-se igual à determinada no vidro. Na determinação da emissividade, aplicou-se novamente o mesmo procedimento descrito na (ASTM 1933 (1999)).

Para além da técnica de termografia infravermelha, encontravam-se aplicados no ambiente e sobre as zonas de estudo, termopares ligados a um sistema de aquisição de dados para aferir o valor da temperatura superficial na câmara “quente”, tal como a temperatura ambiente. Instalou-se ainda, sobre o vidro, um sistema de termofluxímetros, em que os resultados obtidos, mais tarde, serão incluídos para discussão e para validação do método de IRT. A título de exemplo, apresentam-se na figura (4.2.4) os termogramas obtidos na monitorização do vidro e na monitorização do caixilho. Note-se que existiu o cuidado de evitar o “flash” da câmara de IRT, incidente nas áreas de estudo, pois poderia estar a ser introduzido um erro ao nível da medição da temperatura superficial. Para além da radiação emitida pelo ambiente, pela superfície do vidro ou do caixilho, ainda teríamos a radiação emitida pela câmara de IRT.

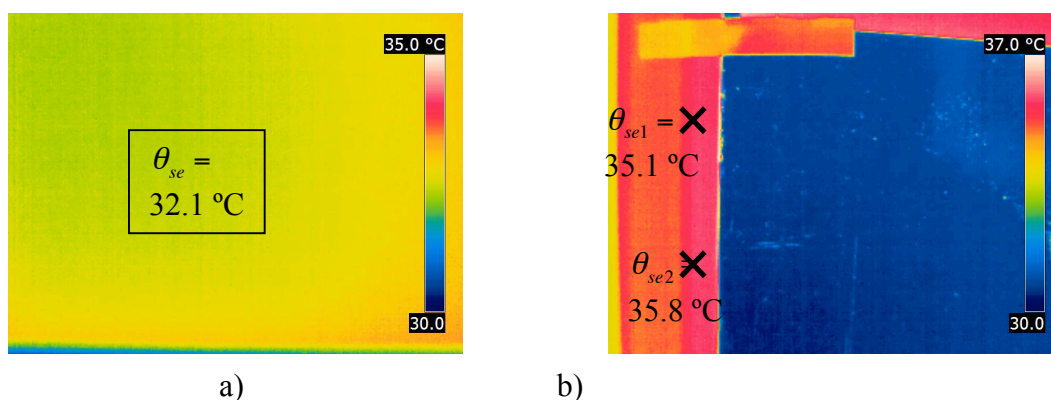


Figura 4.2.4 – Termogramas da janela com distribuição uniforme de temperatura das seguintes componentes: a) vidro; b) caixilho.

No segundo ensaio efectuado, foi analisada uma parede constituída por uma placa de OSB de 18 mm, 70 mm de fibras de polyester e uma placa de 13 mm de gesso cartonado. Na figura 4.2.5. é possível observar uma representação esquemática da constituição da parede e na figura (4.2.6) o provete já se encontra na Hot-Box.

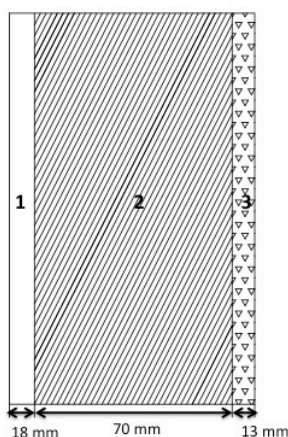


Figura 4.2.5 – Representação esquemática de parede composta por 18 mm de OSB (1), 70 mm de polyester (2) e 13 mm de gesso cartonado (3).



Figura 4.2.6 – Preparação da parede para medições na Hot-box - a) Vista da superfície de gesso cartonado; b) Vista da superfície de OSB.

A condutibilidade térmica deste provete foi determinado previamente através do *Guarded Hot-Plate*, sendo utilizado o procedimento presente na norma EN 12667:2001.

Primeiro foi analisada a placa de gesso cartonado individualmente e de seguida foi testada um sistema composto por uma placa de OSB e por polyester. Com base nos valores de λ ($\text{W}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$) e da espessura foi possível determinar a resistência térmica de todo o conjunto - $R_t = 2.27 \text{ m}^2\cdot\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$.

O sistema que proporciona um aquecimento do ambiente, esteve a $26 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto que a outra encontrava-se, a $15 \text{ }^\circ\text{C}$, existindo um gradiente térmico superior a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. A solução construtiva foi adicionalmente monitorizada por termofluxímetros.

Para o ensaio deste provete, as câmaras foram ligadas a 24 de Abril de 2014. O ensaio foi realizado quando o sistema se encontrava sujeito a um regime permanente de transferência de calor, tendo sido aplicada a técnica de termografia infravermelha, para determinação da emissividade (ASTM 1933 (1999)), temperatura refletida (ASTM 1862 (1997)) e temperatura superficial. Na figura (4.2.7) apresenta-se o termograma obtido na superfície em contacto com o ambiente quente ($26 \text{ }^\circ\text{C}$). A velocidade do vento medida, na câmara “fria”, era muito reduzida, cerca de $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Os dados obtidos foram utilizados mais tarde, para cálculo do coeficiente de transmissão térmica e, subsequentemente, na comparação com o resultado através da aplicação do sistema de termofluxímetros.

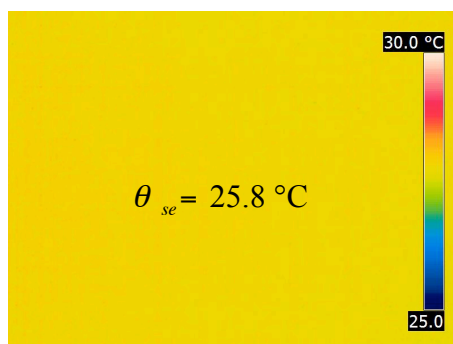


Figura 4.2.7 – Termograma da parede, retirado em regime permanente, evidenciando a uniformização de temperaturas.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados obtidos na Caixa de Ensaio

No momento em que foi iniciada a campanha laboratorial, com o intuito de estudar o coeficiente de transmissão térmica de cada uma das soluções construtivas: MDF; XPS; CBPB; NC, por meio da técnica de termografia infravermelha, tornou-se evidente que o sistema de medição impunha a necessidade de ajustar e controlar um conjunto de condições e parâmetros. Ou seja, houve necessidade em avaliar um conjunto de variáveis e o seu efeito na transferência de calor através das camadas ensaiadas. Foi dada particular atenção às variáveis utilizadas em cada uma das expressões, (16), (22) e (23).

Tal como já referido, primeiro foram analisadas três expressões, desenvolvidas no âmbito do estudo do coeficiente de transmissão térmica para fachadas de edifícios, recorrendo à técnica de termografia infravermelha.

Na aplicação das expressões previamente adaptadas tal como referido anteriormente, procedeu-se à avaliação de alguns parâmetros como a emissividade, a temperatura reflectida, determinados a partir da IRT. A temperatura e humidade relativa do ambiente laboratorial, medidas através de um termohigrómetro.

No primeiro ensaio laboratorial de teste, realizado em Outubro de 2013, tornou-se evidente a acumulação de ar quente junto à placa superior. Verificou-se ainda ser necessário a instalação de uma caixa perfurada, composta por um sistema de ventilação, garantindo a distribuição de temperatura junto à superfície interior do elemento construtivo em estudo, em que a velocidade do vento no interior é cerca de 0.3 m.s^{-1} . Para além disso, houve a necessidade de criação de um outro sistema de ventilação adicional aplicado no exterior. Este origina a movimentação de ar junto à superfície exterior do material em estudo, garantindo a presença de um fluxo paralelo à mesma, com uma velocidade de vento controlada e a rondar 0.4 m.s^{-1} . Assim, a velocidade do vento no interior e exterior é diferente de zero, contribuindo para o cálculo do coeficiente de convecção e consequentemente para a avaliação do efeito da convecção, ao nível do sistema.

A partir de Fevereiro de 2014, reiniciaram-se os ensaios de cada material em análise, utilizando as modificações introduzidas. De forma a aferir a validade dos resultados obtidos por aplicação da IRT com as expressões (16), (22) e (23), foi instalado um termofluxímetro (figura 5.1.1) para obter os fluxos de calor através das suas sondas de contacto. Ainda, no interior do provete, encontravam-se também quatro termopares para medição da temperatura

superficial e interior e um colocado no exterior, ligados a um data logger, para gravação das temperaturas medidas.

Um dos objectivos deste trabalho laboratorial, consistiu na avaliação do uso da técnica de termografia infravermelha de forma quantitativa, como perceber se os resultados obtidos poderiam ser reproduzidos, por outra pessoa, a partir de um procedimento de ensaio estabelecido e colocado em anexo (Anexo – A). O sistema adoptado para efetuar esta verificação consistiu na realização de três semanas seguidas de ensaios. Em cada uma das semanas, todos os materiais foram testados uma única vez, sem repetição consecutiva, para se poder aferir a reprodutibilidade do método.

Desta forma, apresentam-se os resultados de três ensaios, realizados para cada uma das soluções construtivas, sendo efectuada uma comparação com o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, seguindo a norma (ISO 6946:2007). Para cada ensaio foi avaliada a percentagem de erro relativo em relação ao resultado obtido laboratorialmente e pela norma, dado por:

$$E = 100 \times \frac{|U_i - U_{LAB}|}{U_i} \quad (35)$$

onde U_i representa o coeficiente de transmissão térmica determinado de acordo com a (ISO 6946:2007) e U_{LAB} é o coeficiente de transmissão térmica obtido por aplicação das equações (16), (22) e (23), com recurso à IRT. Para recordar a forma como foi aplicado o sistema de termofluxímetro, apresenta-se a figura 5.1.1, a título ilustrativo um esquema da vista frontal do provete.

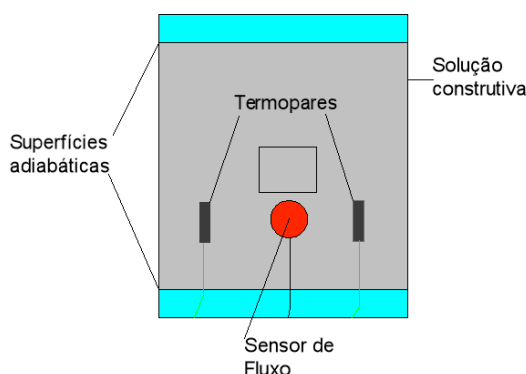


Figura 5.1.1 – Representação esquemática da vista frontal do sensor de fluxo e os respectivos termopares sobre a superfície exterior de cada solução construtiva.

5.1.1 Sistema camada simples

Nos quadros 5.1.1.1, 5.1.1.3, 5.1.1.5 e 5.1.1.7 são apresentados as temperaturas superficial exterior (θ_{se}), superficial interior (θ_{si}), ambiente exterior (θ_e), e ambiente interior (θ_i), e da emissividade (ϵ) de cada um dos materiais. Na figura 5.1.1.2 ilustram-se alguns dos termogramas obtidos e respectiva temperatura superficial obtida na área de medição representada. É ainda visível o sensor de fluxo, o qual se encontra ilustrado na figura 5.1.1. Por último, a comparação dos resultados laboratoriais com os teóricos encontram-se nos quadros 5.1.1.2, 5.1.1.4, 5.1.1.6 e 5.1.1.8.

Quadro 5.1.1.1 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio do MDF.

	θ_{se} (K)	θ_{si} (K)	θ_e (K)	θ_i (K)	θ_{REF} (K)	Emissividade ϵ (-)
1º ensaio	297.45	303.25	293.25	305.12	293.05	0.94
2º ensaio	298.55	303.25	294.75	305.40	295.55	
3º ensaio	208.55	303.59	294.35	305.74	295.35	

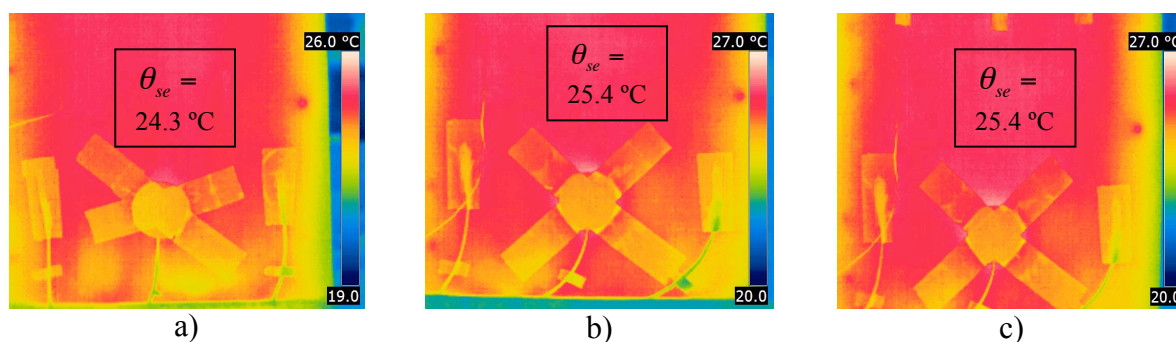


Figura 5.1.1.2 – Termogramas do ensaio do MDF: a) 1º ensaio; b) 2º ensaio; c) 3º ensaio.

Quadro 5.1.1.2 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – MDF.

	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	U_{LAB} (W. m ⁻² .K ⁻¹)			E (%)		
		Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)	Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)
1º ensaio	2.30	2.48	2.62	2.57	7.88	13.80	11.81
2º ensaio	2.31	2.53	2.14	2.12	9.51	7.28	8.32
3º ensaio	2.31	2.61	2.16	2.13	12.92	6.74	7.85

Quadro 5.1.1.3 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio do XPS.

	θ_{se} (K)	θ_{si} (K)	θ_e (K)	θ_i (K)	θ_{REF} (K)	Emissividade ε (-)
1º ensaio	300.95	308.69	297.51	310.65	298.05	0.96
2º ensaio	298.55	306.29	295.34	307.69	296.45	
3º ensaio	303.25	310.25	299.80	312.42	300.45	

Quadro 5.1.1.4 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – XPS.

	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	U_{LAB} (W. m ⁻² .K ⁻¹)			E (%)		
		Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)	Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)
1º ensaio	1.23	1.53	1.29	1.31	24.80	5.34	6.88
2º ensaio	1.22	1.62	1.12	1.13	33.45	8.24	7.13
3º ensaio	1.23	1.63	1.33	1.35	32.36	7.61	9.12

Quadro 5.1.1.5 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio do CBPB.

	θ_{se} (K)	θ_{si} (K)	θ_e (K)	θ_i (K)	θ_{REF} (K)	Emissividade ε (-)
1º ensaio	301.55	305.92	296.73	308.76	297.15	0.96
2º ensaio	301.75	304.38	295.55	307.99	296.85	
3º ensaio	299.95	302.87	294.88	306.63	296.15	

Quadro 5.1.1.6 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – CBPB.

	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	U_{LAB} (W. m ⁻² .K ⁻¹)			E (%)		
		Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)	Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)
1º ensaio	2.83	2.94	2.79	2.75	3.93	1.37	3.05
2º ensaio	2.81	3.65	3.12	3.06	29.80	10.76	8.74
3º ensaio	2.79	3.13	2.56	2.52	11.99	8.43	9.72

Quadro 5.1.1.7 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio do NC.

	θ_{se} (K)	θ_{si} (K)	θ_e (K)	θ_i (K)	θ_{REF} (K)	Emissividade ϵ (-)
1º ensaio	300.15	308.16	297.01	309.54	298.05	0.95
2º ensaio	299.45	307.82	296.23	308.98	297.05	
3º ensaio	298.75	307.55	295.45	397.88	296.45	

Quadro 5.1.1.8 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – NC.

	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	U_{LAB} (W. m ⁻² .K ⁻¹)			E (%)		
		Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)	Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)
1º ensaio	1.41	1.82	1.35	1.36	29.24	4.34	3.61
2º ensaio	1.41	1.82	1.46	1.47	29.54	3.91	4.83
3º ensaio	1.40	1.92	1.46	1.47	36.56	3.78	4.65

Perante os resultados obtidos nos quadros 5.1.2, 5.1.4, 5.1.6 e 5.1.8, podemos observar:

- o erro máximo obtido foi de 36.56 % (no 3º ensaio com o NC, pela equação 16);
- o erro mínimo obtido foi de 1.37 % (no 1º ensaio com o CBPB, pela equação 22);
- os valores do coeficiente de transmissão térmica calculados através da equação (16), apresentam um elevado desvio percentual relativamente ao valor obtido pela norma;
- segundo as equações utilizadas, o erro relativo ao nível dos isolamentos térmicos, é maior do que para materiais não isolantes, devido ao coeficiente de difusividade térmica (apresentado no quadro 4.1.1);
- nas soluções construtivas, MDF e CBPB, a percentagem de erro relativo observado varia entre (1.37 - 29.80) %;
- a equação que apresenta melhores resultados é (23), em que o erro relativo máximo é de 13.80 %.

O XPS e o NC, têm um coeficiente de difusividade térmica mais baixo do que as restantes soluções construtivas em estudo. Deste modo, quando ocorrer alguma perturbação junto à superfície exterior dos elementos referidos, estes não necessitam de um período mais longo para voltar a entrar em equilíbrio com o ambiente que os materiais com coeficientes de difusividade térmicas mais altos. Por outro lado, para materiais não isolantes, MDF e CBPB,

o valor do coeficiente de difusividade térmica é mais elevado, ou seja, qualquer mudança que ocorra sobre a superfície exterior é mais rapidamente recuperada pelo sistema, entrando mais facilmente em equilíbrio térmico. Constata-se que os erros relativos mais elevados são obtidos para as soluções construtivas isolantes. Podemos afirmar que quanto maior for o coeficiente de difusividade térmica menor é a probabilidade de o sistema construtivo não se encontrar em regime permanente e, conseqüentemente, de obtermos erros elevados na determinação do U com recurso à termografia.

Podemos afirmar que a IRT aplicada de forma quantitativa, permite obter resultados válidos, com uma percentagem de erro mínima, na determinação do coeficiente de transmissão térmica. Contudo, realce-se que as medições foram realizadas em condições controladas, havendo um controle sobre alguns parâmetros como, por exemplo, a velocidade do vento.

Sobre a superfície interior e exterior foram colocados adicionalmente, duas sondas que permitem medir o fluxo de calor e termopares, pertencentes a um termofluxímetro. Como já sabido, este método não-destrutivo, possibilita o cálculo do coeficiente de transmissão térmica. Foi aplicado com o intuito de validar a técnica de termografia infravermelha. Deste modo, durante os ensaios, o equipamento foi aplicado em cada uma das soluções construtivas. Pretende-se assim avaliar a resistência térmica de cada um dos elementos construtivos, e posterior comparação com a IRT. Apresenta-se no quadro 5.1.1.9, os resultados obtidos unicamente para o primeiro ensaio de cada material.

Quadro 5.1.1.9 – Erro máximo relativo obtido por comparação da resistência térmica teórica com a (R_t) resistência térmica experimental e com a (R_{HF}) resistência térmica obtida pelo termofluxímetro.

Material	R_T ($m^2.K.W^{-1}$)	R_{LAB} ($m^2.K.W^{-1}$)			R_{HF} ($m^2.K.W^{-1}$)	$E_{máx}$ (%)		
		Eq.(16)	Eq.(22)	Eq.(23)		R_T vs R_{LAB}	R_T vs R_{HF}	R_{LAB} vs R_{HF}
MDF	0.1514	0.1198	0.0988	0.1056	0.2200	13.77	45.29	45.29
XPS	0.5110	0.3516	0.4603	0.4714	0.4662	24.35	8.77	31.19
CBPB	0.0833	0.0698	0.0883	0.0945	0.1171	3.97	40.52	40.52
NC	0.4383	0.2783	0.4649	0.4705	0.5762	29.09	31.47	31.47

No quadro 5.1.1.9, é ainda apresentado o valor da resistência térmica, representada por (R_t), de cada elemento construtivo determinado a partir da ISO 6946:2007. Para além disso, foi calculada a resistência segundo cada uma das equações (16), (22) e (23) e o resultado da aplicação do sistema do termofluxímetro (R_{HF}). Por comparação da técnica de IRT com o termofluxímetro verifica-se uma percentagem de erro relativo elevada correspondente ao

método do termofluxímetro. O cálculo da resistência térmica de acordo com as equações (16), (22) e (23) considerou que as resistências térmicas era iguais às determinadas através do procedimento descrito em 2.4. Contudo, a temperatura superficial exterior, neste caso, é dada pela medição do valor com a câmara de termografia. A comparação realizada, resultou da seleção dos valores máximos obtidos em cada uma das equações, com o valor teórico e com o termofluxímetro. A relação entre estes resultados permite-nos avaliar a validade da aplicação da IRT. Por observação, podemos verificar que o erro relativo máximo, por aplicação do termofluxímetro, é muito superior comparativamente ao da utilização da técnica de termografia infravermelha, excepto no caso do XPS. No ensaio do XPS, a ventilação exterior encontrava-se desligada, ou seja a velocidade do vento exterior ficou igual a zero. Verificou-se que a ausência de ventilação exterior, para o XPS, resultou numa aproximação dos dados obtidos entre os dois métodos.

5.1.2 Sistema multicamada

Para o sistema multicamada é apresentado de seguida o quadro 5.1.2.1 com os dados obtidos em cada ensaio, assim como no quadro 5.1.2.1, apresenta-se os resultados obtidos para cada uma das equações utilizadas e o erro relativo.

Quadro 5.1.2.1 – Temperaturas e emissividade obtidas em cada ensaio de uma sistema multicamada.

	θ_{se} (K)	θ_{si} (K)	θ_e (K)	θ_i (K)	θ_{REF} (K)	Emissividade ε (-)
1º ensaio	301.05	312.44	298.97	313.92	299.55	0.95
2º ensaio	301.65	313.75	299.50	313.56	300.15	
3º ensaio	297.35	307.74	295.06	308.26	295.95	

Quadro 5.1.2.2 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica e apresentação do erro relativo – Sistema Multicamada.

	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	U_{LAB} (W. m ⁻² .K ⁻¹)			E (%)		
		Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)	Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)
1º ensaio	0.71	0.81	0.59	0.59	15.05	16.99	16.37
2º ensaio	0.71	0.90	0.63	0.63	27.02	11.30	10.63
3º ensaio	0.70	0.97	0.60	0.60	38.66	14.85	14.25

Segundo os resultados obtidos, a melhor equação é a (23), uma vez que o erro relativo chega ao valor mínimo de 10.63 %. Por sua vez, a equação (16), apresenta a percentagem de erro mais elevada de 38.66 %, no último ensaio. Teriam de ser realizados mais ensaios para avaliar quais as perturbações que afectam o sistema multicamada.

5.2 Resultados obtidos na Hot-Box

Foram analisadas duas soluções construtivas diferentes na Hot-Box, primeiro uma janela e, de seguida, uma parede constituída por, OSB, polyester e gesso cartonado. Apresentam-se de seguida os resultados para cada uma das soluções.

5.2.1 Janela

Na janela, como já referido, a câmara quente esteve ligada a 45 °C, enquanto que a outra câmara esteve desligada. Para aplicação da técnica de termografia infravermelha, foi necessário aguardar que todo o sistema atingisse o estado permanente. De forma a verificar que não existiam alterações no ambiente, procedeu-se à monitorização do provete, em três períodos diferentes do dia. Os ensaios realizados tiveram a duração de uma semana. Foi analisado o coeficiente de transmissão térmica para o vidro e para o caixilho, conhecendo o valor teórico de cada um (quadro 5.2.1.1). Posteriormente, são apresentados nos quadros 5.2.1.2 e 5.2.1.5 os parâmetros obtidos para o vidro e caixilho, respectivamente. Nas figuras 5.2.1.1 e 5.2.1.2 ilustram-se os termogramas obtidos nas três medições efectuadas em cada componente da janela (vidro e caixilho, respectivamente. Nos quadros 5.2.1.3 e 5.2.1.6. listam-se os resultados obtidos para o coeficiente de transmissão térmica experimental, com recurso à IRT, para o vidro e caixilho, respectivamente. Para além disso, foi realizada a comparação da IRT com a aplicação dos termofluxímetros (quadro 5.2.1.4.), no vidro.

Quadro 5.2.1.1 – Coeficiente de transmissão térmica de elementos constituintes da janela: vidro e caixilho.

Material	$U_t (W.m^{-2}.K^{-1})$
Vidro	1.20
Caixilharia	2.06

Quadro 5.2.1.2 – Temperatura e emissividade obtidas em cada ensaio da janela: Vidro.

	θ_{se} (K)	θ_e (K)	θ_i (K)	θ_{REF} (K)	Emissividade ε (-)
1º ensaio	304.15	299.65	318.15	301.35	0.95
2º ensaio	305.35	301.95	317.45	302.85	
3º ensaio	305.55	302.55	318.05	302.85	

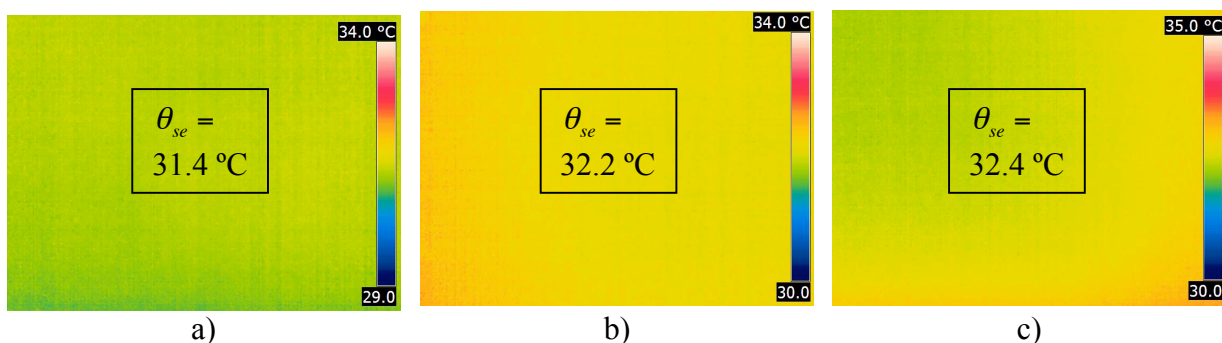


Figura 5.2.1.1 – Termogramas de cada ensaio da janela obtidos no vidro: a) 1º ensaio; b) 2º ensaio; c) 3º ensaio.

Quadro 5.2.1.3 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica do Vidro e apresentação do erro relativo.

	U_t ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	U_{LAB} ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)			E (%)		
		Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)	Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)
1º ensaio	1.20	1.53	1.00	1.01	27.90	16.88	15.83
2º ensaio	1.20	1.41	1.06	1.07	17.23	11.60	10.59
3º ensaio	1.20	1.25	1.13	1.14	3.82	5.82	4.64

Quadro 5.2.1.4 – Erro máximo relativo obtido por comparação da resistência térmica teórica do Vidro com a resistência térmica experimental e com a resistência térmica obtida pelo termofluxímetro.

Ensaio	R_T ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$)	R_{LAB} ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$)			R_{HF} ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$)	$E_{m\acute{a}x}$ (%)		
		Eq.(16)	Eq.(22)	Eq.(23)		R_T vs R_{LAB}	R_T vs R_{HF}	R_{LAB} vs R_{HF}
1º	0.8333	0.5973	0.8795	0.8669	0.6720	39.53	19.36	28.32
2º	0.8333	0.7109	0.9427	0.9321	0.6882	17.23	17.41	17.41
3º	0.8333	0.8027	0.8848	0.8739	0.6882	5.82	17.41	17.41

Quadro 5.2.1.5 – Temperatura e emissividade obtidas em cada ensaio da janela: Caixilharia.

	θ_{se} (K)	θ_e (K)	θ_i (K)	θ_{REF} (K)	Emissividade ε (-)
1º ensaio	308.60	302.55	318.05	302.85	0.97
2º ensaio	307.15	303.25	318.05	303.85	
3º ensaio	308.05	303.35	317.45	303.55	

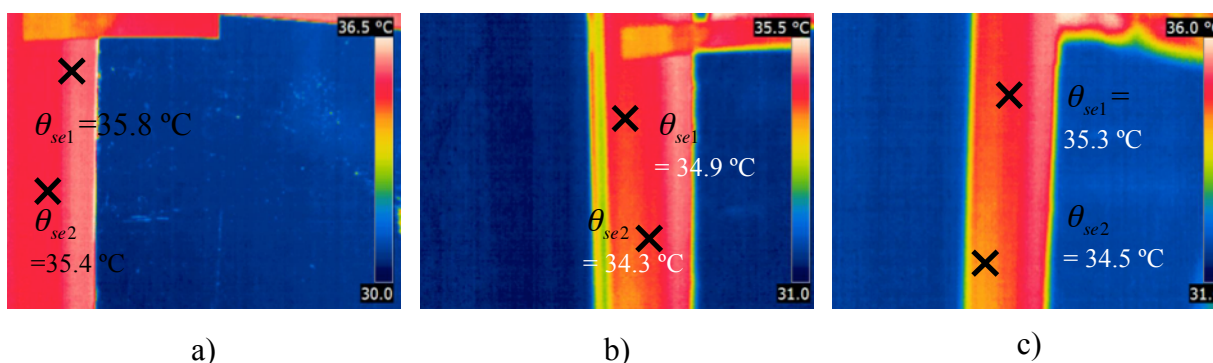


Figura 5.2.1.2 – Termogramas de cada ensaio da janela zona do caixilho: a) 1º ensaio; b) 2º ensaio; c) 3º ensaio.

Quadro 5.2.1.6 – Resultados teórico e experimental do coeficiente de transmissão térmica do caixilho e apresentação do erro relativo, obtido por comparação dos coeficientes referidos.

	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	U_{LAB} (W. m ⁻² .K ⁻¹)			E (%)		
		Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)	Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)
1º ensaio	2.06	2.60	2.48	2.55	26.16	20.42	23.64
2º ensaio	2.06	2.02	1.77	1.81	1.80	13.91	12.36
3º ensaio	2.06	2.22	2.13	2.18	7.86	3.62	5.79

Os resultados obtidos da análise do vidro, demonstram que ao longo da monitorização realizada, o sistema foi evoluindo, ou seja, o erro foi diminuindo nas três equações, desde o 1º ensaio até ao 3º. Assim, supõe-se que o sistema não se encontrava num regime permanente estável.

A equação que apresenta uma percentagem de erro relativo menor é a equação (23), com um erro relativo compreendido entre (4.64 – 15.83) %. Verificando-se, tal como na Caixa de Ensaio, que a expressão (16), apresenta os piores resultados.

À semelhança dos resultados obtidos com a IRT, através da aplicação do termofluxímetro, também é perceptível que o início da monitorização corresponde a um período de tempo em que o sistema ainda estava em regime variável. Contudo, ao longo do tempo, a resistência térmica do vidro determinada por este método não apresenta qualquer modificação, mantendo-se constante. Por sua vez, a metodologia seguida para IRT, demonstra que ao longo do tempo, a tendência corresponde a uma aproximação dos resultados de ensaio com o valor teórico determinado, com um erro relativo máximo de 5.36 % (obtido no 3º ensaio com a equação (22)).

No caixilho também se observa que a equação com melhores resultados é a (23), enquanto a expressão (16) tem um erro relativo máximo de 26.16 %. Devido à largura deste material, não foi possível proceder à colocação do termofluxímetro, não sendo possível fazer a comparação entre as duas técnicas.

5.2.2 Parede

A parede multicamada, instalada na Hot-box, permitiu avaliar a aplicabilidade da técnica de termografia infravermelha face a um sistema multicamada perante um regime permanente. Sobre a superfície foram aplicados dois conjuntos de termofluxímetros, RST01 e RST02, com o objectivo de avaliar a utilização da IRT, em sistemas de multicamada, permitindo fazer uma previsão da sua aplicação a envolventes de edifícios.

Neste caso de estudo, a medição da temperatura superficial com recurso à IRT foi realizada a partir do ambiente mais quente. Deste modo, apenas foram aplicadas as expressões (22) e (23). Para avaliação por IRT, foram consideradas as temperaturas obtidas durante o regime permanente, apresentadas no quadro 5.2.2.1 e na figura 5.2.2.1, no cálculo do coeficiente de transmissão térmica. Os resultados deste último estão presentes no quadro 5.2.2.2, posteriormente apresenta-se a comparação com o sistema do termofluxímetro, quadro 5.2.2.3.

Quadro 5.2.2.1 – Temperatura e emissividade obtidas no ensaio da parede.

	θ_{si} (K)	θ_e (K)	θ_i (K)	θ_{REF} (K)	Emissividade ϵ (-)
ensaio	298.95	288.45	299.15	299.65	0.94

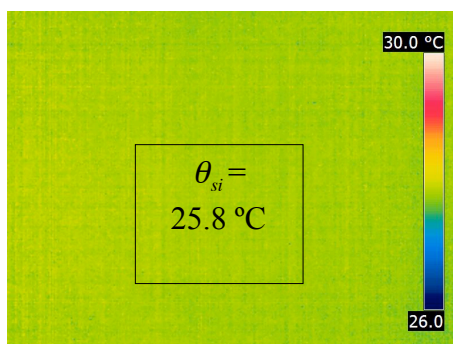


Figura 5.2.2.1 – Termograma do ensaio da parede retirado na câmara “quente”, com características de ambiente interior.

Quadro 5.2.2.2 – Resultados teórico e experimental da resistência térmica da Parede e apresentação do erro relativo obtido por comparação das resistências referidas.

	R_t ($m^2.K.W^{-1}$)	R_{LAB} ($m^2.K.W^{-1}$)			E (%)		
		Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)	Eq. (16)	Eq. (22)	Eq. (23)
ensaio	2.27	-	2.63	2.62	-	15.91	15.52

Quadro 5.2.2.3 – Erro máximo relativo obtido por comparação da resistência térmica teórica da Parede com a resistência térmica experimental e com a resistência térmica obtida pelo termofluxímetro

Termofluxímetro	R_T ($m^2.K.W^{-1}$)	R_{LAB} ($m^2.K.W^{-1}$)			R_{HF} ($m^2.K.W^{-1}$)	$E_{máx}$ (%)		
		Eq.(16)	Eq.(22)	Eq.(23)		R_T vs R_{LAB}	R_T vs R_{HF}	R_{LAB} vs R_{HF}
RST01	2.27	-	2.63	2.62	2.12	15.91	6.87	15.91
RST02					2.10			

Através desta comparação em sistemas multicamada, podemos observar que os termofluxímetros, apresentam uma percentagem de erro relativo máximo inferior aos resultados obtidos por meio da técnica de termografia infravermelha.

Note-se que os erros obtidos são inferiores a 16 %.

6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Neste capítulo, apresenta-se os resultados da análise de sensibilidade efectuada. Esta análise o principal objectivo avaliar as variáveis expostas no capítulo 3, que influenciam o cálculo do coeficiente de transmissão térmico teórico por aplicação das equações (16), (22) e (23).

Pela técnica de termografia infravermelha é possível observar a variação de temperatura superficial dos elementos construtivos. Através da metodologia apresentada no presente estudo, tornou-se possível a quantificação do coeficiente de transmissão térmica, por meio de uma técnica não-destrutiva (IRT). O cálculo deste parâmetro depende do conhecimento da temperatura reflectida, da emissividade da superfície, da velocidade do vento na vizinhança da superfície em análise e da temperatura superficial dos elementos. Esta última, quando medida com recurso à termografia infravermelha, depende da distância da solução construtiva à câmara de IRT, da temperatura e humidade relativa do ambiente, da temperatura reflectida e da emissividade.

Como já referido, primeiro foram caracterizados quatro materiais isolantes e não isolantes: XPS; NC; MDF; CBPB, de camada única e um sistema composto por duas camadas. De seguida, foi estudado o fluxo de calor transmitido em elementos distintos, uma janela e uma parede. Consequentemente, a análise de sensibilidade, comporta a avaliação das componentes necessárias à utilização da IRT, para os diferentes casos de estudo. Foram avaliados os parâmetros enunciados acima.

No subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados obtidos apenas para o caso de estudo do MDF. Os restantes resultados encontram-se em anexo.

6.1 Parâmetros de calibração das medições de termografia infravermelha

De forma a compreender a influência dos parâmetros de calibração na temperatura superficial (θ_{se}) medida pela câmara de IRT, procedeu-se à variação da distância entre a solução construtiva em estudo e câmara, da humidade relativa, da temperatura ambiente e da temperatura reflectida. Note-se que quando um destes parâmetros era modificado, os restantes permaneciam inalterados.

Tornou-se perceptível que só eram introduzidas modificações em θ_{se} caso a distância seja igual ou superior a 3 m. O aumento da distância de 1 m para 3 m conduziu a um aumento de θ_{se} na ordem de 0.3 °C.

A nível da humidade relativa dos ambientes, considerou-se uma variação de $\pm 20\%$. Esta variação não afectou o valor da temperatura superficial exterior, tendo em conta as pequenas distâncias entre a câmara e o objecto.

A variação da temperatura do ambiente permitiu verificar que é necessário existir uma variação de cerca de $\pm 8\text{ °C}$ para provocar uma alteração de 0.1 °C em θ_{se} .

Relembre-se que a θ_{se} utilizada para cálculo do coeficiente de transmissão térmica, pelas equações (16), (22) e (23), não é corrigida com a temperatura reflectida. Contudo, sentiu-se necessidade de conhecer os erros que poderão estar associados ao cálculo da θ_{se} quando existe um desvio no valor da temperatura reflectida (θ_{REF}). Para este fim recorreu-se à temperatura medida pelo termopar colocado na superfície exterior do provete (θ_{se}^{TP}). Portanto, pretende-se comparar unicamente o valor de determinado pelo termopar e pela câmara de IRT, quando é introduzido o parâmetro em estudo, θ_{REF} .

No quadro 6.1.1 apresentam-se os resultados obtidos para o ensaio com o MDF.

Quadro 6.1.1 – Diferença entre a temperatura superficial exterior (θ_{se}) medida pela câmara de termografia com aplicação do factor de correcção com a temperatura superficial exterior medida pelo termopar (θ_{se}^{TP}) no MDF.

Material	Ensaio	θ_{se} (K)	θ_{se}^{TP} (K)	$\Delta = \theta_{se}^{TP} - \theta_{se} $ (K)	E (%)
MDF	1°	296.05	296.56	0.51	0.17
	2°	297.25	297.37	0.12	0.04
	3°	297.35	297.61	0.26	0.09

A análise do quadro 6.1.1 permite verificar que a diferença de temperaturas obtidas entre a medição efectuada pelo termopar e pela IRT é inferior a 0.6 °C. A nível das outras soluções construtivas, a diferença entre a temperatura superficial exterior com correcção, medida pela câmara de IRT com a temperatura superficial exterior obtida pelo termopar, é também muito reduzida, variando entre (0.10 – 1.07) °C.

No quadro 6.1.2 apresentam-se os resultados obtidos para a mesma análise, considerando o ensaio realizado na Hot-Box com a janela, para o vidro.

A temperatura superficial exterior medida pelo termopar, neste caso, é superior à temperatura superficial exterior corrigida (cerca de 3 °C). A nível do caixilho da janela, a diferença é muito reduzida, estando abaixo dos 0.80 °C.

Quadro 6.1.2 – Diferença entre a temperatura superficial exterior (θ_{se}) medida pela câmara de termografia com aplicação do factor de correcção com a temperatura superficial exterior medida pelo termopar (θ_{se}^{TP}) para o ensaio na Hot-box com a janela - Vidro.

Material	Ensaio	θ_{se} (K)	θ_{se}^{TP} (K)	$\Delta = \theta_{se}^{TP} - \theta_{se} $ (K)	E (%)
Janela Vidro	1º	303.25	306.25	3.0	0.98
	2º	303.95	306.55	2.6	0.85
	3º	304.25	307.25	3.0	0.98

6.2 Temperatura reflectida

A temperatura reflectida é responsável pela correcção da temperatura superficial medida pela câmara de termografia infravermelha. Contudo, no presente trabalho a sua relevância deve-se ao impacto que tem na determinação do coeficiente de transmissão térmica por aplicação das equações (16), (22) e (23), e não na determinação da temperatura superficial (uma vez que está a ser considerada na calibração da temperatura superficial). A temperatura reflectida, como já sabido, é determinada pela ASTM 1862 (1997). Contudo podem ocorrer erros na sua determinação devido ao equipamento, ao material utilizado ou ao operador. Assim, tornou-se imperativo a avaliação da sua contribuição e o impacto de um possível erro associado à sua estimativa. É apresentado o resultado obtido desta análise para o MDF, quadro 6.2.1, seguido das conclusões retiradas a partir das restantes soluções construtivas, cujos resultados se encontram no Anexo A.

Quadro 6.2.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.

U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 292.05$ K		$\theta_{REF} = 293.05$ K		$\theta_{REF} = 294.05$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
2.30	(16)	2.48	7.88	2.48	7.88	2.48	7.88
	(22)	3.09	34.34	2.62	13.80	2.15	6.74
	(23)	3.02	31.35	2.57	11.81	2.12	7.94

Por observação do quadro 6.2.1 conclui-se que a variação da temperatura reflectida implica um aumento da percentagem de erro relativo nas equações (22) e (23). Note-se que, por aplicação destas equações, verifica-se que quando a temperatura reflectida diminui, relativamente ao valor determinado, existe um incremento do erro relativo, e vice-versa. O

resultado da equação (16) não é afectado por este parâmetro porque os autores consideram que o valor da temperatura reflectida é semelhante à temperatura ambiente.

As conclusões obtidas com MDF são semelhantes para os restantes materiais. A diminuição da θ_{REF} de 1 °C revelou um aumento de erro máximo de 48.09 %, obtido para o XPS. Relativamente aos ensaios efectuados na Hot-box, apresenta-se o quadro 6.2.2.

Quadro 6.2.2 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.

U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 300.35$ K		$\theta_{REF} = 301.35$ K		$\theta_{REF} = 302.35$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
1.20	(16)	1.67	39.53	1.67	39.53	1.67	39.53
	(22)	1.45	21.18	1.14	5.25	0.82	31.94
	(23)	1.48	23.54	1.15	3.87	0.82	31.29

A variação da temperatura reflectida na superfície do vidro e do caixilho demonstra, de igual modo, que a equação (16), não apresenta qualquer alteração, pelos motivos já enunciados. Observa-se ainda que consoante a temperatura reflectida aumenta, diminui o coeficiente de transmissão térmica e vice-versa.

6.3 Emissividade

A emissividade consiste na propriedade superficial que cada solução construtiva apresenta, consistindo na demonstração da sua capacidade emissão de energia em comparação com um corpo negro ideal. É determinada pela norma ASTM 1933 (1999). No decorrer da aplicação deste procedimento podem existir erros associados, relativamente ao material de emissividade conhecida utilizado. Este parâmetro, sendo um dado de calibração na câmara de IRT, pode facilmente conduzir, a uma leitura errada da temperatura superficial exterior (θ_{se}). Contudo, no presente trabalho a emissividade também tem impacto direto no cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U) por aplicação das equações (16), (22) e (23).

Com o intuito de compreender o efeito da emissividade no cálculo de U (W.m⁻².K⁻¹), considerou-se uma variação da emissividade de 0.05. Importa referir que a emissividade só varia entre 0 – 1.0, como tal, em algumas soluções construtivas, o valor apresentado excedia o limite, como tal, adoptou-se 1.00. Este caso sucedeu-se no XPS e no CBPB, uma vez que possuem uma emissividade de 0.96. Note-se que foi considerado o impacto que esta variação tem na temperatura superficial medida com a câmara de termografia infravermelha.

Apresentam-se nos quadros 6.3.1 e 6.3.2 os resultados da análise efetuada, para a caixa de ensaio e na Hot-box, respectivamente. Os restantes resultados da análise desta variável, estão no Anexo B.

Quadro 6.3.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando uma variação de cerca de 0.05 na emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.

Eq.	$\varepsilon = 0.89$			$\varepsilon = 0.94$			$\varepsilon = 0.99$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	298.35	2.90	25.98	297.45	2.48	7.88	296.05	1.71	25.51
(22)		3.05	32.45		2.62	13.80		1.83	20.40
(23)		2.99	29.70		2.57	11.81		1.81	21.37

Da análise do quadro 6.3.1 observa-se que o erro relativo aumenta tanto com a diminuição da emissividade como com o seu aumento. Já o coeficiente de transmissão térmica, como espectável, aumenta quando a emissividade diminui e vice-versa.

Do estudo dos restantes materiais conclui-se que o XPS tem uma variação de 2.52 a 77.46 %, enquanto o CBPB varia entre 1.02 a 53.39 %, tal como já tinha sido observado na análise da temperatura reflectida. O NC, com uma emissividade de 0.95, apresenta um valor máximo de 78.98 %.

A análise efectuada acima foi reproduzida para a janela, estudada na Hot-box.

Quadro 6.3.2 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.

Eq.	$\varepsilon = 0.90$			$\varepsilon = 0.95$			$\varepsilon = 1.00$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	306.00	1.96	63.33	304.55	1.67	39.53	303.15	1.25	5.00
(22)		1.45	20.83		1.14	5.25		0.57	52.50
(23)		1.48	23.33		1.15	3.87		0.58	51.57

A variação da emissividade do vidro da janela corrobora as conclusões anteriores. Contudo, destaca-se uma diminuição do erro, com o aumento de emissividade, quando aplicada a equação (16).

Qualquer que seja o elemento construtivo em análise, é possível observar que a emissividade é fundamental para determinação da temperatura superficial exterior e do coeficiente de transmissão térmica.

6.4 Velocidade do vento

A medição desta componente influencia o cálculo do coeficiente de transmissão térmico, teórico e laboratorial, devido ao coeficiente de convecção.

Pela expressão (29) sabemos à partida que só é possível determinar este coeficiente pelo conhecimento da velocidade do vento na vizinhança da superfície exterior do elemento construtivo em estudo. O seu valor foi obtido por um anemómetro nos vários ensaios. Porém, a sua sensibilidade poderia não ser a mais apropriada para uma velocidade de vento reduzida. De forma a concluir o efeito de velocidade do vento no valor do coeficiente de transmissão térmica, procedeu-se à variação da velocidade do vento e ao cálculo do valor de U ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Os resultados obtidos são apresentados nos quadros 6.4.1 e 6.4.2, respectivamente para o MDF utilizado na caixa de ensaio e para o vidro da janela ensaiado na Hot-box. Os resultados para os restantes materiais encontram-se no Anexo C.

Quadro 6.4.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.

Eq.	$v = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	E (%)
(16)	1.94	15.53	2.21	3.83	2.48	7.88	2.75	19.58
(22)	2.08	9.61	2.35	2.09	2.62	13.80	2.89	25.50
(23)	2.03	11.60	2.30	0.10	2.57	11.81	2.84	23.51

Os resultados obtidos requerem especial atenção, uma vez que variam consoante a solução construtiva em análise. Note-se que, por exemplo, no caso do MDF (quadro 6.4.1), a diminuição da velocidade do vento para $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ conduz a um decréscimo do erro relativo. Esta conclusão coloca a dúvida se a velocidade do vento real não poderia ser menor. Por sua vez, os ensaios do XPS, como esperado, o aumento da velocidade do vento originou o incremento do erro relativo, uma vez que o valor assumido no cálculo foi de $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. O CBPB, apresenta um comportamento distinto: a percentagem de erro relativo só sofre um aumento se a velocidade do vento diminuir. No NC, qualquer que seja a variação do vento criada conduz a um aumento do erro relativo, em relação ao valor medido e utilizado nas expressões (16), (22) e (23).

Quadro 6.4.2 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º ensaio.

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.1 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.3 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)
(16)	1.57	31.13	1.67	39.53	1.78	47.93	1.88	56.32
(22)	1.04	13.65	1.14	5.25	1.24	3.15	1.34	11.55
(23)	1.05	12.27	1.15	3.87	1.25	4.53	1.36	12.93

Da análise do quadro 6.4.2, relativo ao estudo da influência do vento no cálculo do U do vidro janela, é perceptível que consoante a velocidade do vento aumenta, a percentagem de erro aumenta. Contudo este resultado poderá não ser representativo da realidade uma vez que o sistema, naquele momento, ainda não ter atingido o estado de regime permanente. Nos dois ensaios seguintes verifica-se que o aumento da velocidade do vento provoca uma diminuição do erro relativo. No caixilho, observa-se que uma diminuição da velocidade do vento provoca uma diminuição do valor do erro relativo e vice-versa.

Da análise de sensibilidade realizada, fazendo variar a velocidade do vento, conclui-se que é importante a utilização de um equipamento para medição da velocidade exato nas velocidades de vento inferiores a 1 m.s^{-1} .

6.5 Relevância das componentes da radiação e convecção no valor do coeficiente de transmissão térmica

O trabalho realizado tinha como foco principal avaliar o efeito da radiação medido por IRT. Primeiro importa compreender que as equações (16), (22) e (23), para cálculo do coeficiente de transmissão térmica experimental têm uma componente de radiação e de convecção, RAD + CONV, onde RAD representa a componente da radiação e CONV a componente da convecção. Estas componentes são determinadas de acordo com as equações apresentadas no capítulo 2.

Por forma a compreender a relevância que cada uma das componentes possui no resultado final do coeficiente de transmissão térmica, definiu-se que a percentagem da componente da radiação é dada pela equação (36) e a componente da convecção pela equação (37). A título demonstrativo, são apresentados nos quadros 6.5.1 e 6.5.2 os resultados para a componente da radiação e da convecção, respectivamente, considerando uma solução construtiva térmica não-isolante (MDF) e isolante (NC).

$$Rad(\%) = \frac{RAD}{RAD + CONV} \times 100 \quad (36)$$

$$Conv(\%) = \frac{CONV}{RAD + CONV} \times 100 \quad (37)$$

Quadro 6.5.1 – Importância da componente da radiação resultados obtidos no 1º ensaio: MDF e NC.

MDF	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Rad (%)	NC	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Rad (%)
		2.30	(16) (22) (23)	2.48 2.62 2.57		79.06 78.30 79.43		1.41	(16) (22) (23)

Quadro 6.5.2 – Importância da componente da convecção resultados obtidos no 1º ensaio: MDF e NC.

MDF	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Conv (%)	NC	U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Conv (%)
		2.30	(16) (22) (23)	2.48 2.62 2.57		20.94 21.70 20.57		1.41	(16) (22) (23)

Por observação dos resultados conclui-se que a parcela correspondente à radiação é a mais relevante para o resultado final do coeficiente de transmissão térmica experimental. Esta conclusão é válida tanto para materiais isolantes ou não-isolantes termicamente. No caso do XPS, os resultados obtidos, devem-se unicamente à radiação, visto que velocidade do vento é igual a 0 m.s⁻¹. A percentagem desta componente no MDF, CBPB e NC, é muito semelhante, uma vez que estiveram sujeitos à mesma velocidade do vento.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A motivação por detrás do presente trabalho, relaciona-se com a crescente preocupação em relação às alterações climáticas. As metas propostas pela União Europeia, em que se prevê uma nova estratégia para 2030, são uma evidência da importância em reduzir o consumo de energia. Esta propõe, a redução das emissões com gases de efeito de estufa em 40 %, um aumento da utilização de energias renováveis, em 40 %, 25 % de capacidade de interligação e promoção da eficiência energética em 30 %. A aposta nas energias renováveis não pretende impedir o progresso para a eficiência energética, mas sim acompanhá-lo.

É já do conhecimento geral, que um terço da energia consumida nos edifícios, de serviços ou habitacionais, deve-se à necessidade de aquecimento e arrefecimento. De forma a reduzir este consumo, tem-se vindo a motivar o estudo do desempenho térmico dos edifícios e respectiva certificação energética. Estas medidas têm em conta todas as partes do edifício e do processo construtivo, com vista a desencadear oportunidades de melhoria da eficiência energética.

As medidas de melhoria podem passar pela utilização de equipamento de climatização mais eficientes, recorrer a energias renováveis e/ou otimizar termicamente os elementos da envolvente. Esta otimização passará por aumentar a resistência térmica, conduzindo a um baixo coeficiente de transmissão térmica. Assim, evidencia-se a necessidade, tanto para implementação de medidas de melhoria como para processos de auditorias e certificações energéticas, de conhecer o coeficiente de transmissão térmica de soluções construtivas de edifícios existentes.

A determinação do coeficiente de transmissão térmica de soluções construtivas existentes pode ser determinada com recurso a métodos destrutivos, para obter a composição das soluções. Contudo, no presente trabalho pretendeu-se explorar a técnica de termografia infravermelha (IRT) para a determinação deste parâmetro, evitando-se a abordagem intrusiva mas também o contacto com os elementos.

A IRT consiste na aquisição e tratamento da radiação infravermelha para adquirir imagens térmicas da superfície dos objetos. Uma vez que todos os corpos emitem radiação infravermelha em quantidade proporcional à quarta potência da sua temperatura e emissividade da sua superfície, é possível, através desta técnica, estimar as temperaturas superficiais. Deste modo, considerando um regime de transferência de calor permanente através de uma solução construtiva, as suas temperaturas superficiais podem ser usadas para estimar a transmissão térmica através de soluções construtivas.

Neste trabalho foi avaliada a aplicação da IRT para determinação da resistência térmica de soluções construtivas compostas por uma camada ou multicamada. Para este efeito são consideradas três métodos, propostos por (Fokaides e Kalogirou, 2011), (Albaciti e Tonelli, 2010) e (Vollmer e Möllmann, 2010) para estimar o valor de U. Os coeficientes de transmissão térmica estimados com recurso à IRT foram comparados com os determinados de acordo com a ISO 6946:2007 e também com os obtidos com termofluxímetros.

No capítulo 2 apresentou-se o problema em estudo, tendo em consideração os fenómenos de transferência de calor que nele ocorrem. Estes conceitos revelaram-se fundamentais para a compreensão dos métodos propostos pelos vários autores para a determinação do coeficiente de transmissão térmica. Ainda neste capítulo, foi apresentada a técnica de termografia infravermelha e os vários métodos de cálculo utilizados neste trabalho (métodos propostos por (Fokaides e Kalogirou, 2011), (Albaciti e Tonelli, 2010) e (Vollmer e Möllmann, 2010), método teórico baseado na ISO 6946:2007, e método do termofluxímetro).

O coeficiente de transmissão térmica determinado com base na IRT é afectado por diversos parâmetros: os incorporados nas equações utilizadas (temperatura superficial, emissividade da superfície, temperatura reflectida e velocidade do vento); os que afectam a medição da temperatura superficial com recurso à termografia (temperatura ambiente e humidade relativa do ar, distância ao objecto e emissividade da superfície). No capítulo 3 estes parâmetros foram descritos.

Para avaliação da aplicabilidade da IRT na determinação do coeficiente de transmissão térmica, conceberam-se quatro casos de estudo. Dois desses casos consistiram em protótipos, à escala reduzida, compostos por um material ou por vários materiais ensaiados em ambiente laboratorial. Os outros dois casos de estudo consistiram numa janela e numa parede multicamada instalados numa hot-box. Os casos de estudo, os equipamentos utilizados e a metodologia de ensaio foram descritos no capítulo 4. Os resultados obtidos em cada caso, com recurso à IRT, foram comparados com os coeficientes de transmissão determinados com base na ISO 6946:2007 e com as resistências térmicas obtidas pelas medições efectuadas por um termofluxímetro. Os resultados e conclusões obtidas foram apresentados no capítulo 5.

Os resultados obtidos permitiram constatar que as expressões propostas por (Fokaides e Kalogirou, 2011) e (Vollmer e Möllmann, 2010) revelam os menores erros. Nestes casos o erro variou entre 1.37 e 13.80 %. Já a equação proposta por (Albaciti e Tonelli, 2010) apresentou erros mais elevados (o erro oscilou entre 1.80 e 38.66 %). Estes últimos autores consideram que a temperatura reflectida poderia assumir o valor da temperatura ambiente. Este facto poderá estar na origem dos erros obtidos.

Obtiveram-se maiores erros para os casos de estudo implementados no protótipo à escala reduzida, comparativamente aos ensaios realizados na hot-box.

Por forma a compreender a influência que os parâmetros descritos no capítulo 3 poderiam ter no resultado final do coeficiente de transmissão térmica, apresentou-se, no

capítulo 6, uma análise de sensibilidade. Nesta avaliou-se o impacto que a variação da distância entre a solução construtiva em estudo e câmara, da humidade relativa, da temperatura ambiente e da temperatura reflectida e emissividade poderiam ter no valor da temperatura superficial. Foi ainda avaliada a influência que a temperatura reflectida, emissividade da superfície e velocidade do ar possuíam no resultado do coeficiente de transmissão térmica, por variação de cada um destes parâmetros. A análise de sensibilidade permitiu concluir que a emissividade da superfície influencia significativamente o valor do coeficiente de transmissão térmica. Note-se que a emissividade influencia a componente da radiação considerada no referido cálculo, e esta componente, por sua vez, influencia o resultado final em cerca de 70 %.

Este estudo foi efectuado ao longo de vários meses, tendo sido constantemente aperfeiçoado. Cada uma das melhorias introduzidas correspondia ao conhecimento adquirido relativamente a determinados parâmetros.

O trabalho realizado permitiu verificar a potencialidade da técnica de termografia infravermelha na determinação do coeficiente de transmissão térmica de soluções construtivas e perspectivar a continuação deste trabalho. Esta perspectiva prevê:

- a avaliação do desempenho da IRT em sistemas compostos por uma camada e várias camadas, sujeitos a um regime de transferência de calor variável;
- a aplicação da técnica em ensaio *in-situ*;
- elaboração de um procedimento de ensaio.

Em síntese, o presente trabalho permitiu reconhecer a potencialidade da IRT como ensaio não-destrutivo passível de ser utilizado para determinação do coeficiente de transmissão térmica de soluções construtivas, ficando evidente de que há um conjunto de condições que têm de ser respeitadas. Evidenciou-se de que há um conjunto de cuidados nas medições que devem ser acautelados para minimizar erros e reduzir a incerteza da medição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albaciti, R., Tonelli, A. M. (2010). “Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site”. *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 2177-2183.
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, F. (2012). “A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings”. *Applied Energy*, Vol. 97, pp. 365-373.
- Avdelidis, N. P., Moropoulou, A. (2003). “Emissivity considerations in building thermography”. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 663-667.
- Avdelidis, N. P., Moropoulou, A. (2001). “Emissivity measurements on historic building materials using dual wavelength infrared thermography”. A. E. Rozlosnik, R. B. Dinwiddie (Eds.), *Thermosense XXIII*, SPIE Press, Orlando, Florida, USA, pp. 224–228.
- ASTM (1999). “Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers”. E (1933-99) American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM (1997). “Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers”. E (1862-97) American Society for Testing and Materials, USA.
- Barreira, E., Freitas, V. P. (2007). “Evaluation of building materials using infrared thermography”. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 218-224.
- Cabeza, L. F., Castell, A., Medrano, M., Martorell, I., Pérez, G., Fernández, I. (2010). “Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction”. *Energy and Buildings*, Vol.42, pp. 630 – 636.
- Chudzik, S. (2012). “Measurement of thermal parameters of a heat insulating material using infrared thermography”. *Infrared Physics & Technology*, Vol. 55, pp. 73-83.
- Dactu, S., Ibos, L., Candau, Y., Mattei, S. (2005). “Improvement of building Wall surface temperature measurements by infrared thermography”, *Infrared Physics & Technology* Vol. 46, pp. 451-467.
- Desogus, G., Mura, S., Ricciu, R. (2011). “Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance”. *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp.2613-2620.
- Dufour, M. B., Derome, D., Zmeureanu, R. (2009). “Analysis of thermograms for the estimation of dimensions of cracks in building envelope”. *Infrared Physics & Technology*, Vol. 52, pp.70-78.

-
- EC@ (2014). http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm. Comissão Europeia, (página internet oficial), Bruxelas.
- European Directive (2002/91/EC) of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002, on the energy performance of buildings, Official journal of the European Union, Strasbourg.
- European Directive (2010/31/UE) of the European Parliament and of and of the Council of 19 May 2010, on the energy performance of buildings, Official journal of the European Union, Strasbourg.
- Fokaides, P. A., Kalogirou, S. A. (2011). “Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes”. *Applied Energy*, Vol. 88, pp.4358-4365.
- Hagishima, A., Tanimoto, J. (2003). “Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces”. *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 873-881.
- Hansman Jr., J. R. (1995). “Infrared temperature measurement”. MIT Video Series, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Haralambopoulos, D. A., Paparsenos, G. F. (1996). “Assessing the thermal insulation of old buildings – The need for in situ spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography”. *Energy Convers.* Vol. 39, pp. 65.79.
- Hoyano, A., Asano, K., Kanamaru, T. (1999). “Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of buildings using time sequential thermography”. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3941-3951.
- ISO 6946 (2007). “Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method”, Second edition, 2007-12-05, ISO, Suíça.
- ISO 8302 (1991). “Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus” Second edition, 1991-01-01, ISO, Suíça.
- ISO 8990 (1994). “Thermal insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties – Calibrated and guarded hot box”, First edition, 1994-09-01, ISO, Suíça.
- ISO 9869 (1994). “Thermal insulation – Building elements – *In-situ* measurement of thermal resistance and thermal transmittance”, First edition, 1994-08-01, Suíça.
- ISO 10211 (2007). “Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations”, Second edition, 2013-12-19, Suíça.
- ISO/FDIS 10456 (2007). “Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values” Second edition, 2007-01-09, Suíça.
- ISO 12567-1 (2000). “Thermal performance of window and doors – Determination of thermal transmittance by hot box method – Part 1: Complete Windows and doors”. First edition, 2000-09-01, ISO, Suíça.
- ISO EN 12667 (2001). “Thermal performance of building materials and products –
-

- determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance”, First edition, 2001-03-15, ISO, Suíça.
- ISO/FDIS 13786 (2006). “Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation methods”, Second edition, 2006-12-06, ISO, Suíça.
- ISO 13187 (1998). “Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method”, First edition, 1999-03-15, ISO, Suíça.
- ISO 13789 (2007). “Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method”, First edition, 2007-01-12, Suíça.
- ISO 13790 (2008). “Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling”, First edition, 2008-01-03, Suíça.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), (2006). “Coeficiente de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios”. ITE 50/06, Portugal.
- Martins, S. S.(2008). “Ensaios de Caracterização de Isolamentos Térmicos e de Determinação da Transmissão Térmica (Método da “Hot-Box”)”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Monteiro, J. R. V., Leder, S. M. (2011). “A aplicação da Termografia como ferramenta de investigação térmica no espaço urbano”. VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Vitória, ES, Brasil.
- NP EN 823 (1994). “Produtos de isolamento térmico para aplicação em edifícios. Determinação da espessura”. Ed. 1994, IPQ, Portugal.
- NP EN 1602 (1998). “Produtos de isolamento térmico para aplicação em edifícios. Determinação da massa volúmica aparente”. Ed. Maio 1998, IPQ, Portugal.
- Palyvos, J. (2008). “A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy system’s modeling”. Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 801-808.
- Quinteiro, A. R. (2009). “Utilização a termografia na caracterização de soluções constructivas”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- REH (2013), “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação”. DL118/2013. Portugal.
- Simões, M. I. V. (2013), “Desenvolvimento de modelos numéricos e aplicação da termografia na deteção e Caracterização de defeitos em elementos de construção”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Vol.1.
- Vollmer, M., Möllmann, K. (2010). “Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications”
- Watanabe, K. (1965). “Architectural Planning Fundamentals”.

ANEXO A – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: TEMPERATURA REFLECTIDA

Quadro A.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.

U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 294.55K$		$\theta_{REF} = 295.55 K$		$\theta_{REF} = 296.55 K$	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
2.31	(16)	2.53	9.51	2.53	9.51	2.53	9.51
	(22)	2.67	15.78	2.14	7.28	1.61	30.35
	(23)	2.63	13.94	2.12	8.32	1.60	30.81
U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 294.35 K$		$\theta_{REF} = 295.35 K$		$\theta_{REF} = 296.35 K$	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
2.31	(16)	2.61	12.92	2.61	12.92	2.61	12.92
	(22)	2.65	14.81	2.16	6.74	1.66	28.30
	(23)	2.61	12.91	2.13	7.85	1.64	28.92

Quadro A.2 – Erro relativo associado ao XPS considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 297.05 K$		$\theta_{REF} = 298.05 K$		$\theta_{REF} = 299.05 K$	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
1.23	(16)	1.53	24.80	1.53	24.80	1.53	24.80
	(22)	1.73	40.96	1.29	5.34	0.85	30.64
	(23)	1.76	43.73	1.31	6.88	0.86	29.98
U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 295.45 K$		$\theta_{REF} = 296.45 K$		$\theta_{REF} = 297.45 K$	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
1.22	(16)	1.62	33.45	1.62	33.45	1.62	33.45
	(22)	1.57	29.33	1.12	8.24	0.65	46.21

		(23)	1.60	31.57	1.13	7.13	0.66	45.83
U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 299.45$ K		$\theta_{REF} = 300.45$ K		$\theta_{REF} = 301.45$ K		
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	
1.23	(16)	1.63	32.36	1.63	32.36	1.63	32.36	
	(22)	1.79	45.32	1.33	7.61	0.86	30.48	
	(23)	1.83	48.09	1.35	9.12	0.87	29.85	

Quadro A.3 – Erro relativo associado ao CBPB considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 296.15$ K		$\theta_{REF} = 297.15$ K		$\theta_{REF} = 298.15$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
2.83	(16)	2.94	3.93	2.94	3.93	2.94	3.93
	(22)	3.29	16.15	2.79	1.37	2.30	18.90
	(23)	3.22	13.63	2.75	3.05	2.27	19.90
U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 295.85$ K		$\theta_{REF} = 296.85$ K		$\theta_{REF} = 297.85$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
2.81	(16)	3.65	29.80	3.65	29.80	3.65	29.80
	(22)	3.60	27.86	3.12	10.76	2.63	6.34
	(23)	3.51	24.93	3.06	8.74	2.60	7.62
U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 295.15$ K		$\theta_{REF} = 296.15$ K		$\theta_{REF} = 297.15$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
2.79	(16)	3.13	11.99	3.13	11.99	3.13	11.99
	(22)	3.06	9.47	2.56	8.43	2.06	26.34
	(23)	3.00	7.43	2.52	9.72	2.04	27.04

Quadro A.4 – Erro relativo associado ao NC considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 297.05$ K		$\theta_{REF} = 298.05$ K		$\theta_{REF} = 299.05$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
1.41	(16)	1.82	29.74	1.82	29.24	1.82	29.24

U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 295.15$ K		$\theta_{REF} = 296.15$ K		$\theta_{REF} = 297.15$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
1.41	(16)	1.82	29.54	1.82	29.54	1.82	29.54
	(22)	1.90	35.27	1.46	3.91	1.02	27.78
	(23)	1.93	37.13	1.47	4.83	1.02	27.46
U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 295.15$ K		$\theta_{REF} = 296.15$ K		$\theta_{REF} = 297.15$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
1.40	(16)	1.92	36.56	1.92	36.56	1.92	36.56
	(22)	1.90	35.76	1.46	3.78	1.00	28.53
	(23)	1.93	37.55	1.47	4.65	1.01	28.25

Quadro A.5 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.

U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 301.85$ K		$\theta_{REF} = 302.85$ K		$\theta_{REF} = 303.85$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
1.20	(16)	1.41	17.23	1.41	17.23	1.41	17.23
	(22)	1.44	20.41	1.06	11.60	0.67	43.94
	(23)	1.47	22.39	1.07	10.59	0.68	43.57
U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 301.85$ K		$\theta_{REF} = 302.85$ K		$\theta_{REF} = 303.85$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
1.20	(16)	1.25	3.82	1.25	3.82	1.25	3.82
	(22)	1.51	26.20	1.13	5.82	0.74	38.15
	(23)	1.54	28.40	1.14	4.64	0.75	37.69

Quadro A.6 – Erro relativo associado ao caixilho da janela considerando no cálculo uma variação de temperatura reflectida em cerca de 1 °C para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 301.85$ K		$\theta_{REF} = 302.85$ K		$\theta_{REF} = 303.85$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)

2.06	(16)	2.60	26.16	2.60	26.16	2.60	26.16
	(22)	2.87	39.46	2.48	20.42	2.08	1.19
	(23)	2.96	43.89	2.55	23.64	2.13	3.39
U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 302.85$ K		$\theta_{REF} = 303.85$ K		$\theta_{REF} = 304.85$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
2.06	(16)	2.02	1.80	2.02	1.80	2.02	1.80
	(22)	2.19	6.23	1.77	13.91	1.35	34.25
	(23)	2.24	8.67	1.81	12.36	1.37	33.89
U_t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Eq.	$\theta_{REF} = 302.55$ K		$\theta_{REF} = 303.55$ K		$\theta_{REF} = 304.55$ K	
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
2.06	(16)	2.22	7.86	2.22	7.86	2.22	7.86
	(22)	2.57	24.70	2.13	3.62	1.70	17.66
	(23)	2.64	27.93	2.18	5.79	1.72	16.35

Quadro A.7 – Diferença entre a temperatura superficial exterior medida pela câmara de termografia com aplicação do factor de correcção com a temperatura superficial exterior medida pelo termopar (T) – Caixa de ensaio.

XPS	Ensaio	θ_{se} (K)	θ_{se}^{TP} (K)	$\Delta = \theta_{se}^{TP} - \theta_{se} $ (K)	E (%)
	1°	300.05	300.61	0.56	0.19
	2°	297.95	298.05	0.10	0.03
	3°	302.25	302.93	0.68	0.22
CBPB	Ensaio	θ_{se} (K)	θ_{se}^{TP} (K)	$\Delta = \theta_{se}^{TP} - \theta_{se} $ (K)	E (%)
	1°	301.55	302.20	0.65	0.22
	2°	300.85	301.15	0.30	0.10
	3°	299.05	300.12	1.07	0.36
NC	Ensaio	θ_{se} (K)	θ_{se}^{TP} (K)	$\Delta = \theta_{se}^{TP} - \theta_{se} $ (K)	E (%)
	1°	300.15	299.85	0.30	0.10
	2°	298.35	298.93	0.58	0.19
	3°	297.65	297.98	0.33	0.11

Quadro A.8 – Diferença entre a temperatura superficial exterior medida pela câmara de termografia com aplicação do factor de correcção com a temperatura superficial exterior medida pelo termopar (T) – Hot-box.

Material	Ensaio	θ_{se}^{TP} (K)	θ_{se}^{TP} (K)	$\Delta = \left \theta_{se}^{TP} - \theta_{se} \right $ (K)	E (%)
Janela Caixilho	1º	307.85	307.25	0.6	0.20
	2º	306.95	307.75	0.8	0.26
	3º	307.25	307.25	0.0	0.0

ANEXO B – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: EMISSIVIDADE

Quadro B.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.

Eq.	$\varepsilon = 0.89$			$\varepsilon = 0.94$			$\varepsilon = 0.99$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	299.75	3.20	38.53	298.55	2.53	9.51	297.35	1.79	22.51
(22)		2.86	23.81		2.14	7.28		1.37	40.69
(23)		2.81	21.65		2.12	8.32		1.36	41.13
Eq.	$\varepsilon = 0.89$			$\varepsilon = 0.94$			$\varepsilon = 0.99$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	299.85	3.29	42.42	298.55	2.61	12.92	297.45	2.00	13.42
(22)		2.88	24.68		2.16	6.74		1.50	35.06
(23)		2.84	22.94		2.13	7.85		1.49	35.50

Quadro B.2 – Erro relativo associado ao XPS considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

Eq.	$\varepsilon = 0.91$			$\varepsilon = 0.96$			$\varepsilon = 1.00$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	302.25	2.01	63.41	300.95	1.53	24.80	299.95	1.13	8.13
(22)		1.78	44.72		1.29	5.34		0.88	28.46
(23)		1.82	47.97		1.31	6.88		0.88	27.64
Eq.	$\varepsilon = 0.91$			$\varepsilon = 0.96$			$\varepsilon = 1.00$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	300.05	2.08	70.49	298.85	1.62	33.45	297.95	1.25	2.46
(22)		1.60	31.15		1.12	8.24		0.72	40.98
(23)		1.63	33.61		1.13	7.13		0.73	40.16
Eq.	$\varepsilon = 0.91$			$\varepsilon = 0.96$			$\varepsilon = 1.00$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB}	E (%)	θ_{se}	U_{LAB}	E (%)	θ_{se}	U_{LAB}	E (%)

		(W.m ⁻² .K ⁻¹)		(K)	(W.m ⁻² .K ⁻¹)		(K)	(W.m ⁻² .K ⁻¹)	
(16)		2.19	78.05		1.63	32.36		1.20	2.44
(22)	304.65	1.90	54.47	303.25	1.33	7.61	302.25	0.88	28.46
(23)		1.94	57.72		1.35	9.12		0.89	27.64

Quadro B.3 – Erro relativo associado ao CBPB considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

Eq.	θ_{se} (K)	$\varepsilon = 0.91$		$\varepsilon = 0.96$		$\varepsilon = 1.00$			
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)		2.94	3.89		2.94	3.93		2.91	4.24
(22)	301.75	2.80	1.06	301.55	2.79	1.37	301.35	2.75	2.83
(23)		2.75	2.83		2.75	3.05		2.71	4.24
Eq.	θ_{se} (K)	$\varepsilon = 0.91$		$\varepsilon = 0.96$		$\varepsilon = 1.00$			
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)		4.31	53.38		3.65	29.80		3.15	12.10
(22)	303.15	3.84	36.65	301.75	3.12	10.76	300.75	2.57	8.54
(23)		3.75	33.45		3.06	8.74		2.53	9.96
Eq.	θ_{se} (K)	$\varepsilon = 0.91$		$\varepsilon = 0.96$		$\varepsilon = 1.00$			
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)		3.73	33.69		3.13	11.99		2.58	7.53
(22)	301.15	3.21	15.05	299.95	2.06	26.35	298.95	1.97	29.39
(23)		3.15	12.90		2.04	27.05		1.495	30.11

Quadro B.4 – Erro relativo associado ao NC considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

Eq.	θ_{se} (K)	$\varepsilon = 0.90$		$\varepsilon = 0.95$		$\varepsilon = 1.00$			
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)		1.80	27.66		1.82	29.24		1.84	30.50
(22)	300.25	1.35	4.26	300.15	1.35	4.34	300.05	1.34	4.96
(23)		1.36	3.55		1.36	3.61		1.35	4.26
Eq.	θ_{se} (K)	$\varepsilon = 0.90$		$\varepsilon = 0.95$		$\varepsilon = 1.00$			
		U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	300.75	2.46	74.47	299.45	1.82	29.54	298.35	1.24	12.06

Eq.	$\varepsilon = 0.90$			$\varepsilon = 0.95$			$\varepsilon = 1.00$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(22)		2.12	50.35		1.46	3.91		0.86	39.01
(23)		2.15	52.48		1.47	4.83		0.87	38.30
(16)	299.95	2.51	79.29	298.75	1.92	36.56	297.55	1.27	9.29
(22)		2.07	47.86		1.46	3.78		0.79	44.29
(23)		2.10	50.00		1.47	4.65		0.78	43.57

Quadro B.5 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.

Eq.	$\varepsilon = 0.90$			$\varepsilon = 0.95$			$\varepsilon = 1.00$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	306.85	1.82	51.67	305.35	1.41	17.23	303.95	0.73	39.17
(22)		1.49	24.17		1.06	11.60		0.37	69.17
(23)		1.52	26.67		1.07	10.59		0.37	69.17
(16)	307.10	1.67	39.17	305.55	1.25	3.82	304.15	0.56	53.33
(22)		1.56	30.00		1.13	5.82		0.44	63.33
(23)		1.59	32.50		1.14	4.64		0.44	63.33

Quadro B.6 – Erro relativo associado ao caixilho da janela considerando uma variação de cerca de 0.05 a nível da emissividade, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º.

Eq.	$\varepsilon = 0.92$			$\varepsilon = 0.97$			$\varepsilon = 1.00$		
	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	309.75	2.96	43.69	308.60	2.60	26.16	307.70	2.27	10.10
(22)		2.85	38.35		2.48	20.42		2.15	4.37
(23)		2.94	42.72		2.55	23.64		2.19	6.31
(16)	309.35	2.63	27.67	307.75	2.02	1.80	306.85	1.66	19.42
(22)		2.39	16.02		1.77	13.91		1.40	32.04

(23)	2.45	18.93		1.81	12.36		1.42	31.07	
	$\varepsilon = 0.92$			$\varepsilon = 0.97$			$\varepsilon = 1.00$		
Eq.	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	θ_{se} (K)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)		2.85	38.35		2.22	7.86		1.84	10.68
(22)	309.65	2.77	34.47	308.05	2.13	3.62	307.15	1.75	15.05
(23)		2.85	38.35		2.18	5.79		1.78	13.59

ANEXO C – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: VELOCIDADE DO VENTO

Quadro C.1 – Erro relativo associado ao MDF considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 2º e 3º ensaio.

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	1.99	14.01	2.26	2.25	2.53	9.51	2.80	21.27
(22)	1.60	30.80	1.87	19.04	2.14	7.28	2.41	4.48
(23)	1.57	31.84	1.85	20.08	2.12	8.32	2.39	3.44

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	2.05	11.37	2.33	0.77	2.61	12.92	2.89	25.06
(22)	1.59	31.03	1.87	18.89	2.16	6.74	2.44	5.40
(23)	1.57	32.13	1.85	19.99	2.13	7.85	2.41	4.30

Quadro C.2 – Erro relativo associado ao XPS considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	1.53	24.80	1.73	41.08	1.93	57.36	2.13	73.65
(22)	1.29	5.34	1.49	21.62	1.69	37.90	1.89	54.19
(23)	1.31	6.88	1.51	23.16	1.71	39.44	1.91	55.72

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)	U_{LAB} (W.m ⁻² .K ⁻¹)	E (%)
(16)	1.62	33.45	1.84	51.24	2.06	69.03	2.27	86.81
(22)	1.12	8.24	1.33	9.54	1.55	27.33	1.76	45.12
(23)	1.13	7.13	1.35	10.66	1.56	28.45	1.78	46.24

	$(W.m^{-2}.K^{-1})$		$(W.m^{-2}.K^{-1})$		$(W.m^{-2}.K^{-1})$		$(W.m^{-2}.K^{-1})$		(%)
(16)	1.63	32.36	1.84	49.23	2.05	66.11	2.26	82.99	
(22)	1.33	7.61	1.54	24.49	1.74	41.37	1.95	58.24	
(23)	1.35	9.12	1.55	25.99	1.76	42.87	1.97	59.75	

Quadro C.3 – Erro relativo associado ao CBPB considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)
(16)	2.33	17.59	2.64	6.83	2.94	3.93	3.25	14.69
(22)	2.18	22.89	2.49	12.13	2.79	1.37	3.10	9.39
(23)	2.14	24.57	2.44	13.81	2.75	3.05	3.05	7.71
Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)
(16)	2.89	2.82	3.27	16.31	3.65	29.80	4.03	43.30
(22)	2.36	16.22	2.74	2.73	3.12	10.76	3.49	24.25
(23)	2.30	18.25	2.68	4.76	3.06	8.74	3.44	22.23
Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)
(16)	2.47	11.52	2.80	0.23	3.13	11.99	3.46	23.74
(22)	1.90	31.91	2.23	20.19	2.56	8.44	2.89	3.32
(23)	1.86	33.23	2.19	21.48	2.52	9.72	2.85	2.03

Quadro C.4 – Erro relativo associado ao NC considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º ensaio.

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)
(16)	1.44	2.14	1.63	15.69	1.82	29.24	2.01	42.80
(22)	0.97	31.44	1.16	17.89	1.35	4.34	1.54	9.22
(23)	0.98	30.72	1.17	17.17	1.36	3.61	1.55	9.94
Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	E (%)
(16)	1.44	2.21	1.63	15.88	1.82	29.54	2.01	43.21

(22)	1.08	23.42	1.27	9.76	1.46	3.91	1.65	17.57
(23)	1.09	22.50	1.28	8.83	1.47	4.83	1.67	18.50
Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.6 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)
(16)	1.51	7.57	1.71	22.07	1.92	36.56	2.12	51.05
(22)	1.05	25.20	1.25	10.71	1.46	3.78	1.66	18.27
(23)	1.06	24.33	1.26	9.84	1.47	4.65	1.67	19.14

Quadro C.5 – Erro relativo associado ao vidro da janela considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 2º e 3º.

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.1 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.3 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)
(16)	1.32	10.27	1.41	17.23	1.49	24.18	1.57	31.14
(22)	0.98	18.56	1.06	11.60	1.14	4.65	1.23	2.31
(23)	0.99	17.55	1.07	10.59	1.16	3.64	1.24	3.32
Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.1 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.3 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)
(16)	1.17	2.32	1.25	3.82	1.32	9.96	1.39	16.10
(22)	1.06	11.96	1.13	5.82	1.20	0.32	1.28	6.46
(23)	1.07	10.78	1.14	4.64	1.22	1.50	1.29	7.63

Quadro C.6 – Erro relativo associado ao caixilho da janela considerando uma variação da velocidade do vento, para os valores monitorizados durante o 1º, 2º e 3º.

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.1 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.3 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)
(16)	2.45	18.95	2.60	26.16	2.75	33.37	2.90	40.58
(22)	2.33	13.21	2.48	20.42	2.63	27.63	2.78	34.84
(23)	2.40	16.43	2.55	23.64	2.70	30.85	2.84	38.06
Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.1 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.3 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)
(16)	1.91	7.41	2.02	1.80	2.14	3.82	2.25	9.44
(22)	1.66	19.52	1.77	13.91	1.89	8.29	2.00	2.67
(23)	1.69	17.98	1.81	12.36	1.92	6.74	2.04	1.13

Eq.	$v = 0 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.1 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.2 \text{ m.s}^{-1}$		$v = 0.3 \text{ m.s}^{-1}$	
	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)	U_{LAB} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	E (%)
(16)	2.10	1.70	2.22	7.86	2.35	14.02	2.48	20.18
(22)	2.01	2.53	2.13	3.62	2.26	9.78	2.39	15.94
(23)	2.05	0.37	2.18	5.79	2.31	11.95	2.43	18.11