

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologias

Departamento de Engenharia Civil



Avaliação da qualidade térmica da envolvente de edifícios – Estudo de caso através da análise numérica e por termografia infravermelha

Diogo Filipe Palminha da Costa Marques

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios

Orientador Científico: Professor Doutor Daniel Aelenei

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Arguente: Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques

Vogal: Professor Doutor Daniel Aelenei

Dezembro 2014



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Avaliação da qualidade térmica da envolvente de edifícios – Estudo de caso através da análise numérica e por termografia infravermelha.

Nota: Esta tese de mestrado foi escrita de acordo com o antigo acordo ortográfico.

“Copyright” Diogo Filipe Palminha da Costa Marques, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Daniel Aelenei, cujo contributo e orientação foram importantíssimos na elaboração deste trabalho. A sua ajuda, apoio e motivação foram sem dúvida uma mais valia ao longo destes meses.

Gostaria igualmente de agradecer aos meus pais e irmão, por todo o carinho, apoio e paciência não só durante a elaboração deste trabalho, mas durante toda a minha vida.

Por último gostaria de agradecer aos meus amigos, colegas, familiares e a todas as outras pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a elaboração deste trabalho, um muito obrigado a todos.

RESUMO

O desempenho térmico de um edifício é um factor de enorme relevo no conforto térmico dos seus ocupantes. Em edifícios existentes, devido às técnicas construtivas empregues, este desempenho tende a ser mais fraco. A termografia por infravermelhos é uma técnica de ensaio, que é utilizada no ramo da engenharia civil há mais de três décadas, em vários tipos de ensaios. A análise termográfica é um método de ensaio não destrutivo, rápido e eficaz, o que a torna uma mais-valia no campo do diagnóstico e manutenção preditiva.

O objectivo deste trabalho é avaliar a qualidade térmica da envolvente de edifícios através de uma análise experimental utilizando como recurso a termografia infravermelha. A análise termográfica foi realizada em dois edifícios unifamiliares das décadas de 80 e 90, nos quais foram captadas imagens termográficas para análise da distribuição de temperaturas ao longo da envolvente exterior. Observando os resultados obtidos através desta análise, e estabelecendo uma comparação com os resultados obtidos através da modelação numérica utilizando o *software* BISCO, foi possível caracterizar a qualidade térmica das respectivas envolventes e identificar diferenças entre os resultados obtidos através dos dois métodos. Na parte final do trabalho, é sugerida uma proposta de melhoria para os edifícios analisados, procedendo-se à modelação numérica da aplicação de algumas soluções de reforço de isolamento térmico, de forma a observar o impacto que as mesmas teriam na melhoria do comportamento térmico dos mesmos.

Palavras-Chave: desempenho térmico, termografia por infravermelhos, modelação numérica, BISCO, isolamento térmico.

ABSTRACT

The thermal performance of a building is one the most important factors that affect the thermal comfort of its occupants. In existing buildings, due to the construction techniques employed, this energy performance tends to be poor. Infrared thermography is a measurement technique that has been used for building diagnostics for more than three decades. Thermographic analysis is a quick and efficient non-destructive method for analysis which represents a valuable asset in the field of building maintenance and diagnostics.

The main goal of this work is to evaluate the thermal behavior of the building envelopes through an experimental analysis using infrared thermography. The analysis was performed on two residential buildings, from the 80's and the 90's, on which thermal images were recorded in order to analyze the temperature distribution throughout the building envelope. The results were analyzed and compared with the equivalent obtained using *BISCO software* for numerical modeling. The comparison of the results obtained using both methods allowed the identification of the differences between them. In the last section of this work, an improvement proposal is suggested. Using numerical modeling, the introduction of different insulation reinforcement solutions were simulated in order to determine the impact they would have in the thermal behavior of the analyzed buildings.

Keywords: thermal performance, infrared thermography, numerical modeling, BISCO, insulation reinforcement.

INDÍCE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Objectivos	2
1.3.	Plano de trabalho	2
2.	TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	5
2.1.	Radiação Infravermelha	5
2.2.	Espectro electromagnético e a radiação infravermelha	5
2.3.	Radiação de Corpo Negro	6
2.4.	Radiação de corpo não negro	9
2.5.	Factores que influenciam a medição da radiação	10
2.5.1.	Emissividade dos materiais	10
2.5.2.	Reflectividade dos materiais	11
2.5.3.	Atenuação atmosférica	12
2.6.	Termografia infravermelha no ramo da Engenharia Civil	12
2.7.	Casos de aplicação da termografia no ramo da Engenharia Civil	15
2.8.	Avaliação dos parâmetros relevantes na obtenção de termogramas	18
3.	TÉRMICA DE EDIFÍCIOS	21
3.1.	Transmissão de calor em edifícios	21
3.1.1.	Condução	21
3.1.2.	Convecção.	23
3.1.3.	Radiação	24
3.2.	Coefficiente de transmissão térmica	25
3.3.	Pontes térmicas	26
3.3.1.	Anomalias associadas às pontes térmicas	27
3.4.	Conforto térmico	29
4.	ANÁLISE NUMÉRICA	31
4.1.	<i>Software</i> de modelação BISCO	31
4.2.	Cálculo do fluxo de calor, coeficiente de transmissão térmica e coeficiente de transmissão térmica linear.	33
5.	ANÁLISE EXPERIMENTAL	37
5.1.	Descrição da análise	37
5.2.	Preparação do ensaio termográfico	37
5.3.	Equipamento utilizado	38

5.4. Cálculo da emissividade e da temperatura ambiente reflectida através do método experimental	40
5.4.1. Método experimental para a determinação da temperatura aparente reflectida	40
5.4.2. Método experimental de cálculo da emissividade da superfície	43
5.5. Metodologia	45
5.6. Análise dos edifícios	47
5.6.1. Edifício 1	47
5.6.2. Edifício 2	58
5.6.3. Análise dos resultados	65
6. PROPOSTA DE MELHORIA	69
6.1. Modelação do sistema	69
6.2. Constituição do sistema ETICS	69
6.2.1. Edifício 1	70
6.2.2. Edifício 2	75
7. CONCLUSÕES	79
7.1. Conclusões	79
7.2. Desenvolvimentos futuros	80
BIBLIOGRAFIA	81
ANEXOS	85
Anexo I - Guião para realização de uma inspecção termográfica	87
Anexo II - Relatório de Ensaio - Edifício 1	93
Anexo III - Relatório de Ensaio - Edifício 2	101
Anexo IV – Registo de temperaturas	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição dos consumos de energia em Portugal.	1
Figura 2.1 - Decomposição da luz solar através de um prisma.	5
Figura 2.2 - Espectro electromagnético.....	5
Figura 2.3 - Espectro visível e Infravermelho.	6
Figura 2.4 - Representação da fórmula de Planck para diferentes temperaturas.....	7
Figura 2.5 - Representação da Lei de Wien para diferentes temperaturas.	8
Figura 2.6 - Efeitos que intervêm na medição da radiação infravermelha.	12
Figura 2.7 – Falha no isolamento térmico	13
Figura 2.8 – Falha no isolamento térmico.....	13
Figura 2.9 – Janela mal isolada, dando origem a fugas de ar.....	14
Figura 2.10 – Acumulação de humidade.....	14
Figura 2.11 – Termograma da fachada de um dos edifícios analisados.	15
Figura 3.1 - Mecanismos de transmissão de calor.....	21
Figura 3.2 - Exemplos de pontes térmicas	26
Figura 3.3 - Pontes térmicas devido à transição entre materiais a), e devido à alteração da espessura do elemento b).....	26
Figura 3.4 - Pontes térmicas devido a diferença entre área interna e externa c), e devido a diferentes elementos de ligação d).	27
Figura 4.1 - Programa BISCO.....	32
Figura 4.2 - Output de texto do programa BISCO.	33
Figura 4.3 - Output gráfico do programa BISCO.....	34
Figura 4.4 - Posicionamento dos planos de corte à distância <i>d_{min}</i> da ponte térmica	34
Figura 4.5 - Linhas de fluxo.	35
Figura 4.6 - Exemplo de uma ponte térmica em zona de cunhal	35
Figura 5.1 – câmara termográfica Flir ThermaCam modelo B4.	38
Figura 5.2 - Processo de criação do reflector. (1) Peça de cartão, (2) Folha de alumínio, (3) folha de alumínio amarrotada e reachatada, (4) Cartão envolto com a folha de alumínio (reflector).....	41
Figura 5.3 – Reflector colocado na parede perpendicularmente à câmara.	42
Figura 5.4 – Medição da temperatura no reflector.	42
Figura 5.5 - Superfície da parede coberta com fita isolante preta.	43
Figura 5.6 - Colocação da escala para determinação dos pontos de análise.	45
Figura 5.7 - Representação das linhas isotérmicas que atravessam o pormenor construtivo.....	46
Figura 5.8 - Exemplo de refinamento das linhas isotérmicas no pormenor construtivo.	46
Figura 5.9 – Planta do edifício 1.	47
Figura 5.10 - Fotografia da zona interior do quarto, e respectiva localização no edifício.	47
Figura 5.11 - Termograma da zona interior do quarto e respectivos pontos de análise.	48
Figura 5.12 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.....	48
Figura 5.13 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.....	49
Figura 5.14 - Fotografia da zona exterior do quarto, e respectiva localização no edifício.....	50
Figura 5.15 - Termograma da zona exterior do quarto e respectivos pontos de análise.	50

Figura 5.16 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.....	50
Figura 5.17 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.....	51
Figura 5.18 - Fotografia da zona interior da sala de estar, e respectiva localização no edifício.	52
Figura 5.19 - termograma da zona interior da sala de estar e respectivos pontos de análise.	52
Figura 5.20 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.....	52
Figura 5.21 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.....	53
Figura 5.22 - Fotografia da zona exterior da sala de estar, e respectiva localização no edifício.	53
Figura 5.23 - termograma da zona exterior da sala de estar e respectivos pontos de análise.....	54
Figura 5.24 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.....	54
Figura 5.25 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.....	55
Figura 5.26 - Fotografia da fachada na zona da sala de estar, e respectiva localização no edifício.	56
Figura 5.27 - termograma da fachada e respectivos pontos de análise.	56
Figura 5.28 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.....	57
Figura 5.29 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.....	57
Figura 5.30 – Planta do edifício 2.	58
Figura 5.31 - Fotografia da zona interior da sala de estar, e respectiva localização no edifício.	58
Figura 5.32 - termograma da zona interior da sala de estar e respectivos pontos de análise.	59
Figura 5.33 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.....	59
Figura 5.34 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.....	60
Figura 5.35 - Fotografia da zona exterior da sala de estar, e respectiva localização no edifício.	61
Figura 5.36 - Termograma da zona da sala pelo exterior e respectivos pontos de análise.....	61
Figura 5.37 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.....	62
Figura 5.38 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.....	62
Figura 5.39 - Fotografia da com orientação Norte-Poente, e respectiva localização no edifício.	63
Figura 5.40 - Termograma da fachada com orientação Norte-Poente e respectivos pontos de análise.....	63
Figura 5.41 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.....	64
Figura 5.42 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.....	64
Figura 5.43 - Representação gráfica da comparação entre diferenças de temperatura nas zonas interiores.....	66
Figura 5.44 - Representação gráfica da comparação entre diferenças de temperatura nas zonas exteriores.	67
Figura 5.45 - Representação gráfica da comparação entre diferenças de temperatura na zona de ligação entre o piso intermédio e a fachada.	68
Figura 6.1 - Constituição do sistema de ETICS.	69
Figura 6.2 - Exemplo do sistema ETICS Adoptado. Sistema com placas de EPS com 5 cm.	70
Figura 6.3 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2) ETICS com 3 cm de EPS, (3) ETICS com 5 cm de EPS, (4) ETICS com 8 cm de EPS.	71

Figura 6.4 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2).....	72
Figura 6.5 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (3) ETICS com 5 cm de EPS, (4) ETICS com 8 cm de EPS.	72
Figura 6.6 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2) ETICS com 3 cm de EPS.	73
Figura 6.7 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (3) ETICS com 5 cm de EPS, (4) ETICS com 8 cm de EPS.	74
Figura 6.8 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2) ETICS com 3 cm de EPS, (3) ETICS com 5 cm de EPS, (4) ETICS com 8 cm de EPS.	75
Figura 6.9 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2) ETICS com 3 cm de EPS.	76
Figura 6.10 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (3) ETICS com 5 cm de EPS, ETICS com 8 cm de EPS.	77

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Valores da absorção, reflexão e transmissão espectral em corpos idealizados.....	9
Quadro 3.2 - Valores tabelados para a emissividade de alguns materiais.....	11
Quadro 5.1 – Condutibilidade térmica dos materiais.....	33
Quadro 6.1 - Especificações da Flir ThermaCam modelo B4.....	39
Quadro 6.2 - Resultados da medição da temperatura aparente reflectida.....	42
Quadro 6.3 - Resultados da medição da emissividade.....	44
Quadro 6.4 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.....	49
Quadro 6.5 – Valores do coeficiente de transmissão térmica linear.....	49
Quadro 6.6 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.....	51
Quadro 6.7 – Valores do coeficiente de transmissão térmica linear.....	51
Quadro 6.8 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.....	53
Quadro 6.9 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.....	55
Quadro 6.10 - Valores do coeficiente de transmissão térmica linear.....	55
Quadro 6.11 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.....	56
Quadro 6.12 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.....	59
Quadro 6.12 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.....	60
Quadro 6.13 – Comparação do coeficiente de transmissão térmica linear para zonas semelhantes.....	60
Quadro 6.14 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.....	61
Quadro 6.15 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.....	64
Quadro 6.16 – Comparação do coeficiente de transmissão térmica linear para zonas semelhantes.....	65

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

ETICS - Sistemas de Isolamento Térmico pelo Exterior

EIFS – Exterior Insulation and Finish System

CO₂ – Dióxido de Carbono

SCE - Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior

RCCTE - Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios

ISO - International Organization of Standardization

LCD – Liquid-Crystal Display

ASTM - American Society for Testing and Materials

LNec – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

XPS - Poliestireno expandido extrudido

EPS - Poliestireno expandido moldado

ICB - Placas de aglomerado de cortiça expandida

c – Velocidade da luz (m/s)

h – Constante de Planck ($J.s$)

k – Constante de Boltzmann (J/K)

T – Temperatura absoluta de um corpo negro (K)

λ – Comprimento de onda (μm)

R_t - Radiância espectral total do corpo negro (W/m^2)

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2 K^4$)

Q – Fluxo de calor (W)

λ – Condutibilidade térmica do material ($W/m.^{\circ}C$)

A – Área da superfície (m^2)

e – Espessura do elemento (m)

θ_i – Temperatura no interior ($^{\circ}C$)

θ_e – Temperatura no exterior ($^{\circ}C$)

R_j – Resistência térmica do elemento j ($m^2.^{\circ}C/W$)

h_c – Condutância térmica do material ($W/(m^2.^{\circ}C)$)

θ_s – Temperatura da superfície da envolvente ($^{\circ}C$)

θ_f – Temperatura do ar ($^{\circ}C$)

ρ – Massa específica do ar (Kg/m^3)

C_p – Calor específico do ar ($Kj/^{\circ}C$)

R_{ph} - Taxa de renovação do ar do local (h^{-1})

V – Volume do local (m^3)

ε – emissividade da superfície

Ψ - coeficiente de transmissão térmica linear ($W/m \cdot ^\circ C$)

χ - coeficiente de transmissão térmica pontual ($W/^\circ C$)

B – Dimensão linear da ponte térmica (m)

$U_{X,Z}$ – Coeficiente de transmissão térmica segundo a direcção X ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

$U_{Y,Z}$ – Coeficiente de transmissão térmica segundo a direcção Y ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

l_x – Comprimento do elemento segundo a direcção x (m)

l_y – Comprimento do elemento segundo a direcção y (m)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Vivemos numa época em que o custo de vida é cada vez mais alto, e o aquecimento global é uma realidade cada vez mais presente, provocando alterações nos padrões de temperatura, pelos quais sempre nos regemos. A eficiência energética assume um papel de destaque nas políticas de sustentabilidade, que visam diminuir a dependência de combustíveis fósseis, e promover o uso de energias renováveis, de forma a melhorar o comportamento energético dos edifícios.

Ao nível da Europa, o sector dos edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo total de energia, e 36% das emissões de CO₂, sendo que as previsões apontam para um aumento do consumo de energia no sector dos edifícios [1]. Em Portugal de acordo com a ADENE quase um terço da energia é consumida nos edifícios, e se for contabilizado somente o consumo de energia eléctrica este valor ascende aos 62% [24].

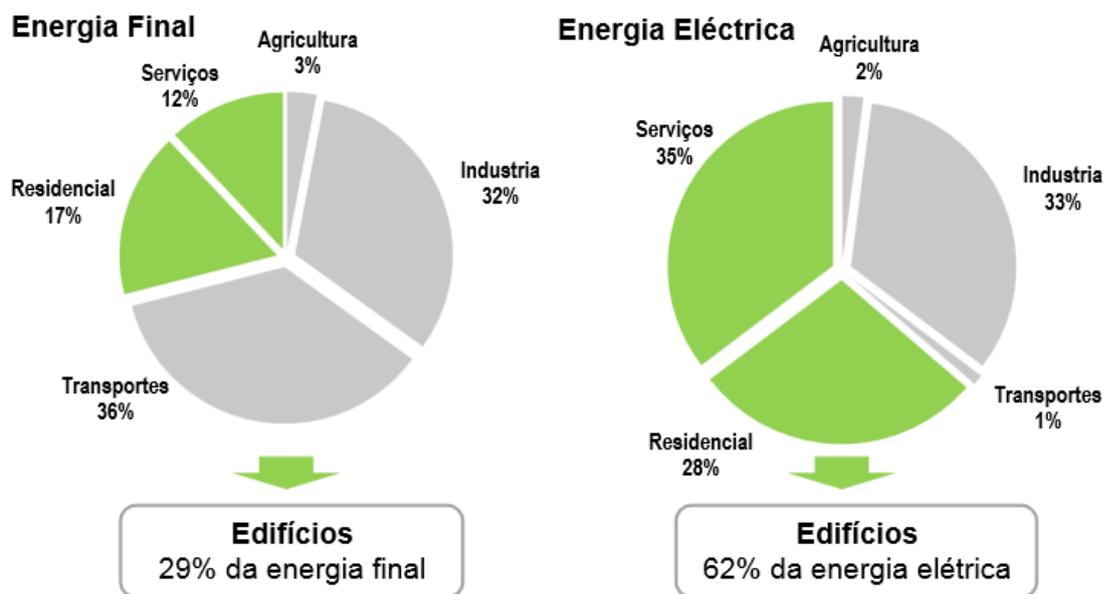


Figura 1.1 – Distribuição dos consumos de energia em Portugal [24].

A envolvente de um edifício e, sobretudo, a sua performance energética, são aspectos que devem ser alvo de análise criteriosa tendo em conta o papel que desempenham ao nível do comportamento térmico do edifício.

A termografia por infravermelhos é uma técnica não destrutiva, com utilização em vários ramos da ciência. No ramo da Engenharia Civil a sua utilização mais comum é nas áreas de diagnóstico e

manutenção de edifícios, onde é utilizada para identificar patologias relacionadas com a falta de isolamento, existência de humidade, e fugas ou infiltrações de ar, entre outras.

No âmbito da realização deste trabalho, a potencialidade mais interessante desta técnica é a sua utilização, na caracterização do comportamento térmico da fachada de um edifício. Através da captação de imagens térmicas, é possível analisar a distribuição de temperaturas que ocorre devido às trocas de energia entre o edifício e os ambientes interior e exterior.

1.2. Objectivos

O objectivo principal deste trabalho passa por analisar a qualidade térmica da envolvente de dois edifícios unifamiliares existentes, estabelecendo uma comparação entre os resultados obtidos através de termografia infravermelha e análise numérica. Para a concretização deste objectivo serão analisados dois edifícios unifamiliares localizados na mesma zona, e com características semelhantes. Serão analisadas as características dos edifícios e será efectuado um ensaio termográfico, de forma a efectuar um levantamento do comportamento da envolvente exterior dos mesmos. Para comparação dos resultados obtidos, serão modelados os pormenores constructivos das zonas analisadas, utilizando um *software* de análise numérica.

O outro objectivo do trabalho passa por propôr e analisar soluções de reforço do isolamento térmico dos edifícios. Utilizando um *software* de modulação numérica, será modelada a aplicação de várias soluções de reforço do isolamento térmico sobre a solução construtiva existente em ambas os edifícios, e verificados os resultados obtidos.

1.3. Plano de trabalho

No primeiro capítulo será realizado um enquadramento ao tema, assim como serão descritos os objectivos e metodologias do trabalho.

O segundo capítulo é dedicado aos princípios da termografia infravermelha. São explicados os conceitos por detrás da radiação infravermelha, assim como os factores determinantes na sua medição.

O terceiro capítulo aborda a temática da térmica de edifícios, e aborda conceitos importantes, como os fenómenos de transmissão de calor, pontes térmicas, e o conforto térmico.

No quarto capítulo é abordado o *software* de modelação numérica, e os princípios utilizados cálculo dos pormenores constructivos modelados.

O quinto capítulo é o mais importante, uma vez que tem carácter experimental, e é ao longo deste capítulo que se apresentam os resultados das análises efectuadas.

O sexto capítulo é dedicado à análise das propostas de melhoria dos edifícios estudados.

No sétimo e último capítulo apresentam-se as conclusões sobre os resultados obtidos, e apresentam-se algumas sugestões para futuros desenvolvimentos.

2. TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

2.1. Radiação Infravermelha

A descoberta da radiação infravermelha deve-se ao astrónomo inglês Sir William Herschel, que no ano de 1800 procurava descobrir quais as cores do espectro responsáveis pelo aquecimento de objectos. Da sua pesquisa concluiu que a temperatura aumentava à medida que se passava do violeta para o vermelho, sendo que a maior temperatura se verificava, para além do vermelho, e do espectro visível.

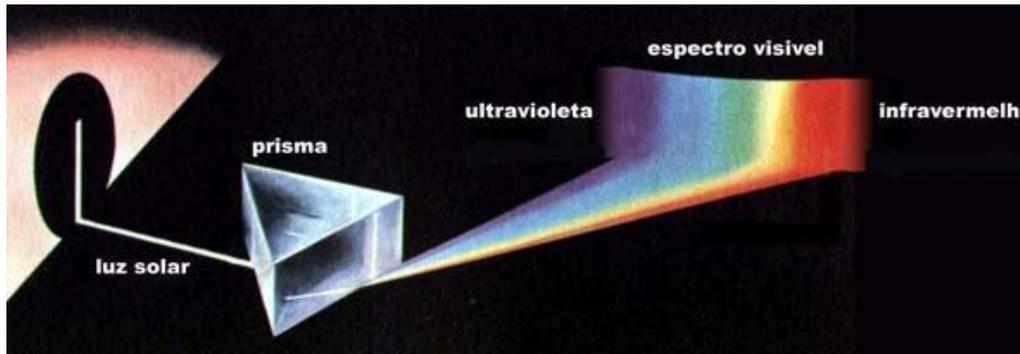


Figura 2.1 - Decomposição da luz solar através de um prisma [2].

2.2. Espectro electromagnético e a radiação infravermelha

Todos os corpos emitem e absorvem radiações electromagnéticas, que resultam das agitações internas da matéria. Na génese de qualquer substância estão os átomos ou moléculas que oscilam e trocam cargas eléctricas entre si. As vibrações e a rotação dos átomos carregados em torno do seu centro de gravidade dão origem à emissão de ondas electromagnéticas.

O espectro electromagnético abrange uma vasta gama de comprimentos de onda, sendo que apenas a fracção entre os 0,35 e os 0,75 μm é visível ao olho humano.

	RAIOS CÓSMICOS		RAIOS γ				RAIOS X		ULTRA-VIOLETAS	VISÍVEL	INFRAVERMELHOS		ONDAS DE RÁDIO											
λ		10^{-4} nm	10^{-3} nm	10^{-2} nm	10^{-1} nm	1 nm	10 nm	0,1 μm	1 μm	10 μm	100 μm	0,1 cm	1 cm	10 cm	1 m	10 m	100 m	1 km	10 km	100 km				
ν (Hertz)		$3,10^{21}$	$3,10^{20}$	$3,10^{19}$	$3,10^{18}$	$3,10^{17}$	$3,10^{16}$	$3,10^{15}$	$3,10^{14}$	$3,10^{13}$	$3,10^{12}$	$3,10^{11}$	$3,10^{10}$	$3,10^9$	$3,10^8$	$3,10^7$	$3,10^6$	$3,10^5$	$3,10^4$	$3,10^3$				

Figura 2.2 - Espectro electromagnético [3].

Todos os corpos com uma temperatura superior ao zero absoluto (-273°C) emitem energia de forma contínua, com diferentes intensidades e comprimentos de onda, conforme a sua temperatura e

características. A energia emitida pelos corpos situa-se na região do espectro definida como infravermelhos, que engloba os comprimentos de onda entre os 0,75 e os 1000µm.

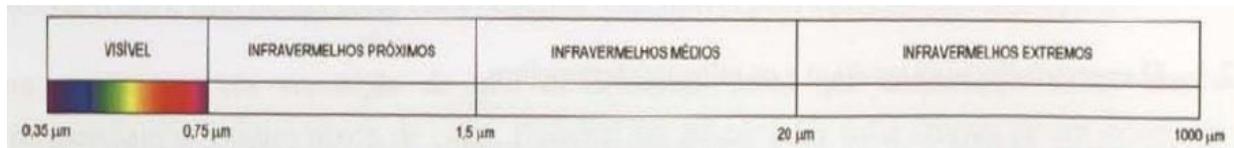


Figura 2.3 - Espectro visível e Infravermelho [3].

A radiação infravermelha divide-se em três categorias, nomeadamente infravermelhos próximos (0,75-1,5µm), infravermelhos médios (1,5-20µm) e os infravermelhos extremos (20-1000µm).

2.3. Radiação de Corpo Negro

A emissão de energia por parte dos corpos está relacionada com a noção de corpo negro. Um corpo negro é a definição que se atribui a um objecto que absorve toda a radiação de que é alvo, independentemente do comprimento de onda.

A Lei de Kirchhoff determina que um corpo capaz de absorver toda a radiação em qualquer comprimento de onda é igualmente capaz de emitir radiação. Apesar de ser um conceito teórico, é possível recriar de forma prática o conceito de corpo negro. Construindo uma caixa impermeável à luz utilizando material absorvente opaco, excepto numa pequena abertura num dos lados da mesma. A radiação que entra pela abertura é dispersa e absorvida por reflexões repetidas, sendo que apenas uma fracção infinitesimal dessa radiação irá ser perdida através da abertura, resultando na absorção quase integral dessa radiação.

A radiação emitida por um corpo negro é traduzida através da Lei de Planck.

$$\frac{dR(\lambda,T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} [W/m^3] \quad (3.1)$$

Em que:

$\frac{dR(\lambda,T)}{d\lambda}$ – Radiância espectral do corpo negro a comprimento de onda λ

c – Velocidade da luz = 3×10^8 m/s

h – Constante de Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ J.s

k – Constante de Boltzmann = $1,4 \times 10^{-23}$ J/K

T – Temperatura absoluta (K) de um corpo negro

λ – Comprimento de onda (μm)

A representação gráfica da fórmula de Planck produz uma família de curvas (Figura 2.4).

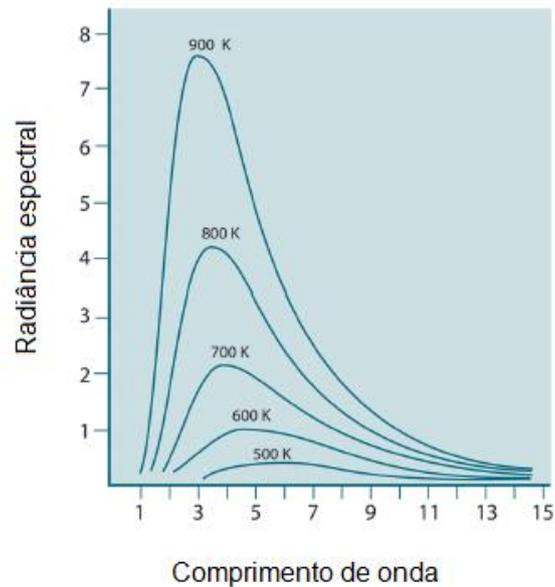


Figura 2.4 - Representação da fórmula de Planck para diferentes temperaturas. Adaptado de [4]

Como se pode ver pela figura 2.4, a radiação espectral começa com valor zero para $\lambda=0$, de seguida atinge rapidamente o seu valor máximo, voltando ao zero à medida que aumenta o comprimento de onda. Observa-se ainda que quanto maior a temperatura, mais rapidamente se atinge o valor máximo para a radiação espectral.

Derivando a Lei de Planck em função do comprimento de onda, obtém-se a Lei do deslocamento de Wien, que traduz o deslocamento do máximo valor da radiação espectral em função da temperatura [3].

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}] \quad (3.2)$$

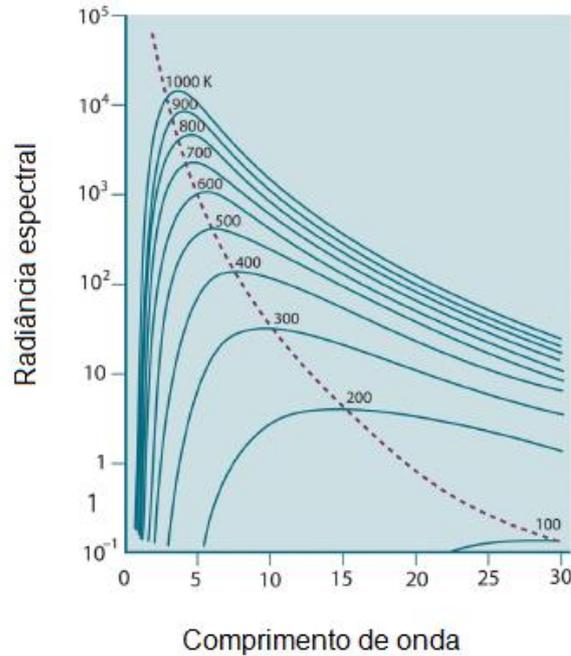


Figura 2.5 - Representação da Lei de Wien para diferentes temperaturas. Adaptado de [4]

Através da figura podemos ver que quanto maior a temperatura do corpo, maior a radiação espectral, registrando-se o valor máximo a um comprimento de onda menor. A temperatura aparente do sol é de 6000 K e o valor máximo da radiação ocorre para $\lambda_{m\acute{a}x} = 0,5\mu\text{m}$, precisamente na posição central da gama visível do espectro [3].

A lei de Stefan-Boltzmann resulta da integração da Lei de Planck, e permite obter o valor total da radiação espectral de um corpo negro para uma determinada temperatura T.

$$R_t = \sigma \times T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.3)$$

Em que:

R_t - Radiação espectral total do corpo negro

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{k}^4\text{]}$ – Constante de Stefan-Boltzmann

T – Temperatura absoluta do corpo negro (K)

Uma vez que se trata da derivada da Lei de Planck a radiação espectral total é representada pela área delimitada pela respectiva curva de Planck para uma determinada temperatura.

2.4. Radiação de corpo não negro

De maneira geral os corpos reais não apresentam as características de um corpo negro, e assim sendo quando a energia incide sobre eles, uma parcela é absorvida (α), sendo a restante reflectida (ρ) e transmitida (τ). Estas parcelas dependem do comprimento de onda, e o seu somatório é sempre igual à unidade [3].

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (3.4)$$

Em que:

$\alpha(\lambda)$ – Absorção espectral, que traduz a razão entre a radiância absorvida pelo objecto e a radiância total que sobre ele incide para um dado comprimento de onda.

$\rho(\lambda)$ – Reflexão espectral, que traduz a razão entre a radiância reflectida pelo objecto e a radiância total que sobre ele incide para um dado comprimento de onda.

$\tau(\lambda)$ – Transmissão espectral, que traduz a razão entre a radiância transmitida pelo objecto e a radiância total que sobre ele incide para um dado comprimento de onda.

Para haver equilíbrio, a absorção de energia de um corpo tem de ser compensada pela energia que o mesmo emite. À energia emitida pelo corpo dá-se o nome de emissividade espectral $\varepsilon(\lambda)$. De acordo com a lei de Kirchhoff da radiação térmica, para qualquer material a uma determinada temperatura e para um dado comprimento de onda, a emissividade e a absorção espectrais da sua superfície são iguais, ou seja:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \quad (3.5)$$

No quadro 3.1 estão estabelecidos os valores de $\varepsilon(\lambda)$, $\rho(\lambda)$ e $\tau(\lambda)$ para alguns materiais, que ilustram os vários extremos da equação.

Quadro 2.1 - Valores da absorção, reflexão e transmissão espectral em corpos idealizados.

Corpo Negro	$\varepsilon(\lambda) = 1$	$\rho(\lambda) = 0$	$\tau(\lambda) = 0$
Corpo transparente	$\varepsilon(\lambda) = 0$	$\rho(\lambda) = 0$	$\tau(\lambda) = 1$
Espelho perfeito	$\varepsilon(\lambda) = 0$	$\rho(\lambda) = 1$	$\tau(\lambda) = 0$
Superfície opaca	$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$		$\tau(\lambda) = 0$
Corpo cinzento	$\varepsilon(\lambda) = \text{constante}; \rho(\lambda) = \text{constante}$		

2.5. Factores que influenciam a medição da radiação

A análise dos resultados obtidos através da termografia pode ser complicada, e eventualmente conduzir a conclusões erradas, Caso não sejam tomadas as devidas precauções na preparação e realização dos ensaios.

A termografia por infravermelhos consiste na captação de imagens do calor radiado por uma superfície, denominados termogramas. Caso não sejam tomadas as devidas precauções na preparação e realização dos ensaios, os resultados podem ser bastante diferentes. Como tal, é necessário conhecer os factores que podem ter influenciado nos resultados obtidos, assim como a forma como estes afectam os mesmos.

2.5.1. Emissividade dos materiais

A emissividade de uma superfície define a eficiência com que esta emite radiação, comparativamente com um corpo negro à mesma temperatura. A emissividade varia em função de três factores, nomeadamente:

- Comprimento de onda;
- Direcção ou ângulo de observação em relação à superfície;
- Temperatura da superfície.

A emissividade varia com o comprimento de onda de uma forma relativamente lenta em materiais sólidos, apresentando flutuações bruscas em elementos líquidos ou gasosos. Nos metais a emissividade diminui com o aumento do comprimento de onda, e no caso dos não-metais verifica-se exactamente o contrário, ainda que de uma forma mais aleatória [3].

Em superfícies não planas, o ângulo de observação pode influenciar a emissividade, apresentando valores diferentes de ponto para ponto mesmo não havendo alteração do material da superfície. Em elementos não metálicos, a variação da emissividade é praticamente nula para ângulos entre os 0° e 60° em relação à perpendicular à superfície. Para ângulos superiores a 70° a emissividade decai rapidamente até zero. Nos metais verificam-se valores baixos e sem grande variação para ângulos entre os 0° e 40°, registando um aumento acentuado para ângulos superiores [3].

Existem diversos materiais cuja emissividade pode ser considerada independente da direcção da radiação e do comprimento de onda. Neste tipo de materiais é possível considerar a emissividade constante, para uma determinada temperatura. A este tipo de emissividade atribui-se o nome de emissividade total, que traduz a relação entre a energia emitida pelo material com a energia emitida

por um corpo negro à mesma temperatura. Os metais apresentam uma emissividade total pouco elevada, aumentando para temperaturas mais elevadas. Os não-metais têm uma emissividade total mais elevada, geralmente superior a 0,8 sendo que esta baixa para temperaturas mais elevadas [3].

O fluxo óptico é a grandeza medida pelos detectores de infravermelhos, que depende da emissividade e da temperatura do elemento em estudo. Para obter medições reais para a temperatura, torna-se necessário conhecer o valor efectivo da emissividade da superfície que está a ser analisada.

O valor da emissividade da superfície pode ser obtido através de métodos simplificados, ou recorrendo a listas que apresentam valores tabelados para a emissividade dos diferentes elementos (quadro 3.2).

Quadro 2.2 - Valores tabelados para a emissividade de alguns materiais. Adaptado de [4]

Material	Temperatura (°C)	Emissividade
Alumínio (polido, folha)	100	0,05
Areia	20	0,90
Betão	20	0,92
Estuque (rugoso, lima)	10 - 90	0,91
Madeira (carvalho, aplainado)	20	0,90
Papel (branco)	20	0,70 - 0,90
Tijolo (alvenaria, rebocada)	20	0,94

No entanto, a utilização de valores tabelados deve ser feita de forma cuidada, uma vez que os valores tabelados são referentes a medições efectuadas com determinadas condições, nomeadamente, a temperatura de ensaio, o acabamento da superfície do material, a gama de comprimentos de onda adoptada e o ângulo de medição.

2.5.2. Reflectividade dos materiais

A reflectividade dos materiais é uma propriedade que pode influenciar os resultados de uma medição. A energia captada pelo receptor, resultante da radiação emitida por um corpo à temperatura T_0 , resulta da sobreposição de três efeitos (Figura 2.6) [3].

- O corpo reflecte uma fracção da energia emitida pelo ambiente, equivalente à emitida por um corpo negro à temperatura T_a .
- Se o corpo é parcialmente transparente, transmite uma fracção da radiação emitida pelo fundo, correspondente à emitida por um corpo negro à temperatura T_f .
- O corpo que emite radiação própria, por se encontrar à temperatura T_0 .

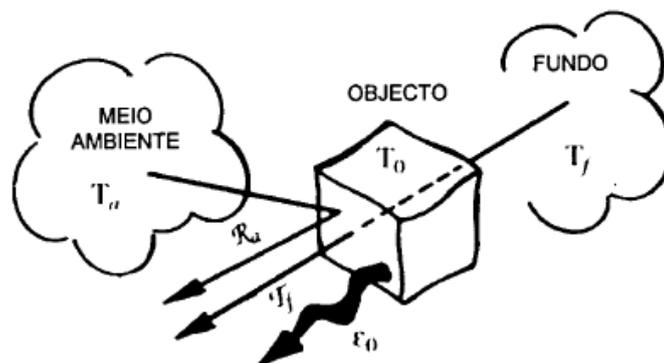


Figura 2.6 - Efeitos que intervêm na medição da radiação infravermelha. [3]

Se o corpo estiver rodeado de outros corpos a diferentes temperaturas, maiores do que a do corpo em questão, o parâmetro relacionado com a energia emitida, função da sua temperatura T_0 e emissividade ϵ_0 , é afectado devido à reflexão por parte do corpo, da radiação incidente emitida pelos objectos que o rodeiam.

2.5.3. Atenuação atmosférica

A presença da atmosfera entre a fonte emissora e o equipamento pode originar perturbações na medição. Além da atenuação resultante da propagação atmosférica, os gradientes térmicos e a turbulência criam heterogeneidades no índice de refração do ar, o que resulta na degradação da qualidade da imagem obtida através do equipamento. A atenuação atmosférica é a principal causa de problemas durante as medições uma vez que acarreta erro sistemático, que é função da gama espectral utilizada, da distância de observação e das condições meteorológicas. Assim sendo, todas as medições efectuadas a uma distância superior a 10 metros devem ser corrigidas [3].

2.6. Termografia infravermelha no ramo da Engenharia Civil

Existem várias aplicações para a termografia por infravermelhos, uma vez que se trata de uma técnica não evasiva. As suas aplicações mais comuns são nas áreas de diagnóstico e manutenção de edifícios. A utilização da termografia infravermelha permite a detecção de problemas ainda numa fase inicial, possibilitando uma intervenção atempada, e evitando assim males maiores.

Uma inspecção termográfica permite identificar o seguinte:

- Visualização de perdas de energia;
- Detecção da falta de isolamento ou defeitos no isolamento;

- Detecção de fugas ou infiltrações de ar;
- Detecção de humidade no isolamento, no tecto, ou nas paredes tanto no interior como no exterior;
- Detecção de bolor e áreas mal isoladas;
- Localização de pontes térmicas e elementos estruturais;
- Localização de fugas em coberturas planas;
- Detectar fugas em canalizações;
- Detectar falhas em sistemas de aquecimento e ar condicionado.

Apesar do equipamento permitir a detecção de todos estes defeitos, é necessário que o utilizador do equipamento seja qualificado, de forma a poder interpretar correctamente os termogramas. A interpretação incorrecta dos mesmos poderá resultar num diagnóstico incorrecto.

No caso representado na figura 2.7 verifica-se a falta de isolamento térmico numa secção da parede. Neste caso o termograma permite identificar facilmente a falha, uma vez que a zona em questão apresenta uma temperatura superior à restante envolvente. A figura 2.8 verifica-se o mesmo problema, mas desta feita a situação verifica-se no interior do edifício.

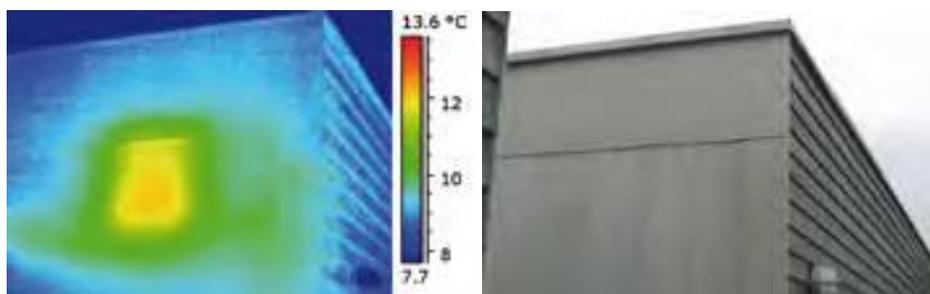


Figura 2.7 – Falha no isolamento térmico [9].

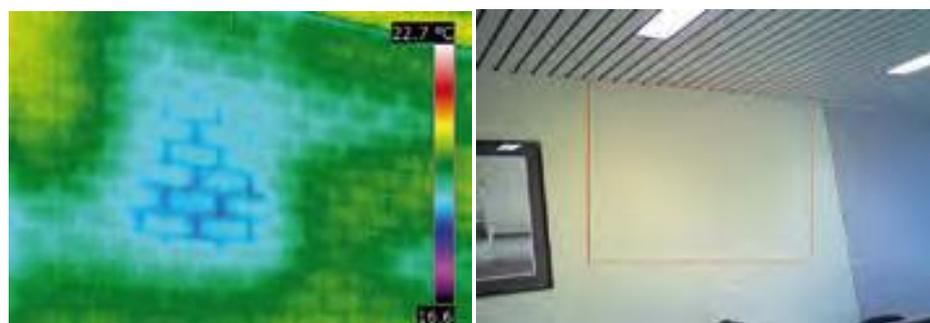


Figura 2.8 – Falha no isolamento térmico [9].

A existência de fugas ou infiltrações de ar compromete o funcionamento dos sistemas de aquecimento e ar condicionado, resultando em consumos mais elevados. Pode ainda dar origem a condensações internas, comprometendo igualmente a qualidade do ar interior. Em casos de existência deste tipo de

anomalia, é possível identificar um padrão em que as zonas em torno da anomalia estão arrefecidas, devido à passagem de ar frio, como ilustrado na figura 2.9.

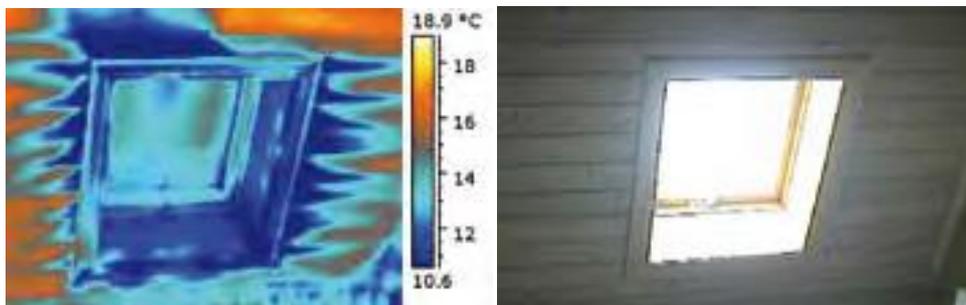


Figura 2.9 – Janela mal isolada, dando origem a fugas de ar [9].

A detecção de humidade é um processo relativamente simples, uma vez que as zonas afectadas são facilmente identificáveis num termograma. A figura 2.10 representa dois destes casos, um na zona do piso e outro no tecto de uma habitação. Para uma identificação mais fácil das zonas afectadas, é necessário um aumento da temperatura da zona analisada, uma vez que os materiais molhados aumentam de temperatura de forma bastante mais lenta que os secos.

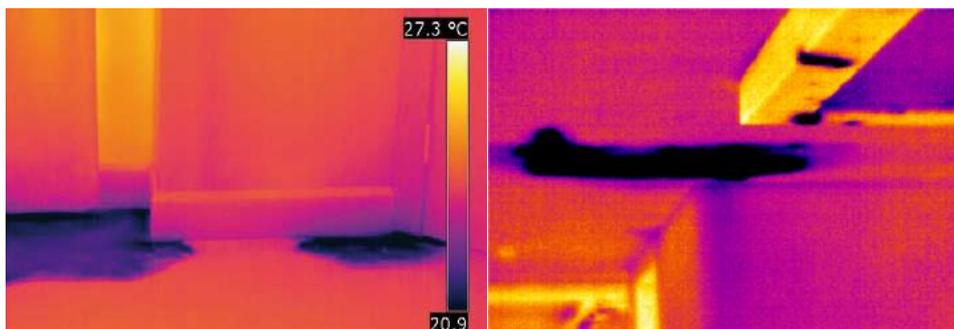


Figura 2.10 – Acumulação de humidade [9][8].

A termografia infravermelha é particularmente eficaz na detecção de pontes térmicas e elementos estruturais. Na figura 2.11 está representada a fachada de um dos edifícios analisados neste trabalho, e são facilmente identificáveis os elementos estruturais e as zonas de ponte térmica, uma vez que estes apresentam uma temperatura superior relativamente aos restantes elementos da envolvente, e como tal aparecem com uma coloração mais clara.



Figura 2.11 – Termograma da fachada de um dos edifícios analisados.

2.7. Casos de aplicação da termografia no ramo da Engenharia Civil

No campo da engenharia civil, a termografia infravermelha surge geralmente associada a estudos no âmbito da avaliação da qualidade térmica da envolvente de edifícios, ou na detecção de anomalias relacionadas com a presença de humidade, falta de isolamento, e fugas ou infiltrações de ar. Análises qualitativas e quantitativas têm sido utilizadas por diversos autores, no estudo de vários tipos de anomalias associadas a edifícios.

A análise qualitativa apresenta menores condicionantes, e geralmente é utilizada em estudos de carácter mais geral, uma vez que se trata de uma análise mais simples, em que se pretende registar a diferença local da temperatura superficial, de forma a identificar anomalias.

LI, *et al* [28] em 2000 utilizaram a termografia infravermelha na detecção de azulejos descolados em fachadas de edifícios, e desta forma identificar anomalias relacionadas com infiltração de humidade.

Em 2002 GRINZATO, *et al* [29], utilizaram a técnica de termografia no estudo de edifícios históricos, detectando elementos ocultos nas paredes, de diferentes materiais. Os autores detectaram ainda restauros efectuados anteriormente.

OCAÑA, *et al* [30], levaram a cabo em 2004 um estudo onde analisam 2 edifícios rurais em Espanha, um de construção moderna e outro com construção do final do século XIX. Os autores avaliam a utilidade do uso da termografia infravermelha para avaliar a qualidade da envolvente dos edifícios em causa, e concluíram que a termografia é um método adequado para a comparação das perdas de energia entre edifícios, e que consoante o tipo de edifício pode ser mais proveitoso realizar o ensaio termográfico durante a noite, ou durante a madrugada.

WOERNER, *et al* [31], em 2006, analisaram termograficamente a envolvente de 5 grandes edifícios públicos, sendo que a análise foi efectuada exclusivamente pelo exterior de forma a contornar limitações de acesso aos edifícios em causa. De acordo com a metodologia proposta o estudo revelou ser possível identificar a localização e extensão de zonas onde se registam grandes fugas de ar, zonas com isolamento térmico deficitário, infiltrações de humidade em sistemas do tipo ETICS, e perdas de calor excessivas na zona das portas e janelas, entre outros. No entanto o estudo revela que a metodologia tem algumas limitações, não sendo possível detectar zonas onde as infiltrações de ar ocorrem do exterior para o interior, assim como quantificar desempenhos energéticos e outras anomalias que apenas podem ser identificadas numa análise pelo interior. Os autores elaboraram ainda um protocolo de inspecção a edifícios exclusivamente pelo exterior para servir de guião em análises semelhantes.

CANDORÉ [32] em 2008 estudou a utilização da termografia infravermelha na detecção de falhas no isolamento térmico de edifícios. O autor utiliza este método para analisar anomalias frequentes, atestando à sua utilidade na detecção de falhas devido à inexistência ou insuficiência de isolamento.

SUONKETO, *et al.* [33], em 2009 propuseram-se analisar termograficamente 3 edifícios unifamiliares na Finlândia, de forma a verificar a estanquidade dos mesmos. Neste estudo a técnica de termografia infravermelha foi utilizado conjuntamente com um teste de pressurização do edifício, descrito na EN 13829:2000 Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method. Os autores realizaram um ensaio termográfico antes do ensaio de pressurização e outro posteriormente, e através da comparação entre os ensaios determinaram os pontos onde existiam problemas de estanquidade. Os edifícios foram alvo de intervenção para reparação das anomalias detectadas, e um novo teste de estanquidade comprovou a valência da metodologia empregue.

A análise quantitativa requer outro tipo de cuidados, e apresenta maiores condicionantes uma vez que é necessário quantificar as variações da temperatura superficial, sendo necessário o uso de um *software* para introdução de dados referentes à emissividade, temperatura ambiente, distância à superfície e humidade, de forma a efectuar as devidas correcções aos valores da temperatura registados.

No trabalho realizado em 2004, BARREIRA [3] estudou os vários factores que influenciam a medição num ensaio termográfico, de forma a determinar a sensibilidade do equipamento. A autora procede ainda à preparação de um catálogo de emissividades de diversos materiais, para facilitar a realização

de futuros ensaios. A termografia é descrita pela autora como uma técnica de aplicação simples, no entanto, se não forem tomadas as devidas precauções na preparação e realização dos ensaios e na análise dos resultados, podem chegar-se a conclusões erradas, correndo o risco de confundir defeitos da superfície analisada com irregularidades na temperatura superficial. Na análise ao trabalho desenvolvido, a autora defende ainda que a emissividade, a reflectividade e a atenuação atmosférica são os principais factores a considerar para a realização de uma medição.

SNELL, *et al* [34], em 2002 e WILD 2007 [35], discutiram a importância de formação adequada e da especialização em física das construções e métodos construtivos, de forma produzir diagnósticos correctos de edifícios utilizando a termografia infravermelha.

KALAMEES, *et al* [36], em 2008, publicaram em 2008 o resultado de um estudo efectuado em 21 edifícios unifamiliares e em 16 edifícios de apartamentos na Finlândia, no qual os autores analisam a localização das zonas de ponte térmica e de fuga de ar para o exterior, utilizando a termografia e um teste de pressurização. Os autores determinam através de uma análise estatística a localização e tipo de ponte térmica e fuga de ar que se verificam neste tipo de edifícios.

Em 2008 JAWORSKI [37], apresentou os resultados da sua pesquisa no uso da termografia para avaliar qualitativamente as perdas de calor de edifícios para exterior e determinar a sua eficiência térmica. O Autor chegou à conclusão que a perda de calor do edifício para o exterior, depende do ambiente exterior e das suas condições, do coeficiente de transmissão térmica linear, da capacidade térmica e da estanquidade. O autor defende o uso do método radiométrico baseado na determinação da distribuição da intensidade de radiação térmica em tempo real, para a análise do processo de perda de energia por parte de um edifício.

No estudo levado a cabo por WRÓBEL e KISILEWICS [38] em 2008, os autores estudam os diversos parâmetros que condicionam a recolha de dados fiáveis para um estudo quantitativo das pontes térmicas de um edifício. Os autores usam a análise termográfica e análise computacional para estudar esses parâmetros. Os mesmos KISILEWICS e WRÓBEL [39] em 2010 efectuaram um estudo quantitativo de uma parede. A parede com bom isolamento foi colocada numa câmara climática em laboratório, de forma a eliminar as variações de temperatura que ocorrem durante um ensaio in-situ. Os autores concluíram que caso os valores da transmissão térmica sejam determinados correctamente, a precisão da câmara termográfica é suficiente para uma análise quantitativa parede. Em caso de uma análise in-situ os autores defendem a realização de vários ensaios espaçados no tempo e a utilizam de valores médios, de forma a eliminar eventuais erros de medição devido a flutuações das condições durante a realização dos ensaios.

Em 2011 FOKAIDES e KALOGIROU [40] avaliaram a aplicação da termografia infravermelha na determinação do valor do coeficiente de transmissão térmica da envolvente de edifícios. Os autores compararam os resultados obtidos através da termografia, com resultados obtidos usando um termohigrómetro, e os valores da norma ISO 9869:1994 Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, obtendo resultados aceitáveis.

Mais recentemente em 2013, GONZÁLEZ-AGUILERA, *et al* [41], desenvolveram um estudo com foco na determinação da eficiência energética da envolvente de edifícios. Os autores obtêm dados geométricos e térmicos através da termografia, e utilizam técnicas de modelação automática para criar modelos tridimensionais que utilizam na determinação da eficiência energética.

Já no decorrer do ano de 2014 EDIS, *et al* [42], publicaram os resultados de um estudo levado a cabo para detectar problemas de humidade em fachadas com revestimento cerâmicos aderente. Os autores validaram a utilização da termografia infravermelha e os ganhos solares do edifício como método para detectar preliminarmente as anomalias. Os resultados são posteriormente comparados com os obtidos através de análise numérica.

2.8. Avaliação dos parâmetros relevantes na obtenção de termogramas

A termografia infravermelha, pela sua especificidade e método de aplicação, está sujeita a uma série de factores, que, de uma forma ou de outra vão influenciar os resultados obtidos durante uma medição. Para o uso correcto do equipamento, é importante conhecer estas condicionantes associadas à sua utilização. Estas podem ser divididas em três categorias:

- Condicionantes de medição - Emissividade adoptada, temperatura do ambiente, distância entre a câmara e o objecto, e definições do equipamento.
- Condicionantes térmicas - Condições do objecto e da sua envolvente, no período anterior e durante a realização ensaio;
- Condicionantes devido a fontes externas – A influência de factores não relacionados com o objecto, como sombras, ou reflexão proveniente de outros objectos.

Ajuste incorrecto da emissividade

A emissividade varia consoante o comprimento de onda, a direcção ou ângulo de observação em relação à superfície e a temperatura superficial. A definição correcta da emissividade é bastante importante para a obtenção de valores correctos da temperatura superficial.

Reflectividade dos materiais

A reflectividade de um material é o resultado da radiação emitida pelo corpo devido às suas propriedades, e da radiação emitida pelo corpo devido à reflexão da radiação incidente proveniente de outros objectos. É necessário eliminar ou limitar ao máximo a influência de outros objectos na temperatura da superfície em análise.

Definição incorrecta da temperatura aparente reflectida

O parâmetro da temperatura ambiente reflectida pode ser calculado por meio de um ensaio (descrito no ponto 4.4.2). Da definição incorrecta deste parâmetro podem resultar valores incorrectos de temperatura.

Termograma desfocado

Na altura da recolha dos termogramas é importante ter atenção ao foco da imagem, uma vez que esta propriedade não pode ser alterada posteriormente [10].

Distância de medição

A cada ponto no termograma corresponde uma determinada área. Esta varia de acordo com a distância a que a câmara se encontra da superfície analisada. Quando a medição é efectuada a uma distância maior, cada ponto corresponde a uma área maior de superfície, e a temperatura registada passa a ser uma média da zona, perdendo-se o detalhe [11]. Uma maior distância entre o equipamento e a zona a analisar implica também uma maior influência da atenuação atmosférica.

Atenuação atmosférica

A presença da atmosfera entre a fonte emissora e o equipamento pode originar perturbações na medição. Além da atenuação resultante da propagação atmosférica, os gradientes térmicos e a turbulência criam heterogeneidades no índice de refacção do ar, o que resulta na degradação da qualidade da imagem obtida através do equipamento. A atenuação atmosférica é a principal causa de problemas durante as medições uma vez que acarreta erro sistemático, que é função da gama espectral

utilizada, da distância de observação e das condições meteorológicas. Assim sendo, todas as medições efectuadas a uma distância superior a 10 metros devem ser corrigidas [3].

Radiação solar

Os ensaios devem ser realizados em períodos do dia ou da noite em que a radiação solar, ou a sua ausência, produza o mais rápido aquecimento, ou arrefecimento da superfície [2]. Mesmo em dias com o céu nublado, a radiação solar difusa pode alterar os padrões térmicos do exterior do edifício, pelo que os ensaios exteriores devem ser efectuados durante o período da noite, evitando assim alteração das características devido ao sol.

Fontes externas de radiação

A existência de fontes externas de radiação, como aquecedores, luzes ou candeeiros deve ser acautelada. Estes aparelhos devem ser desligados antes do início do ensaio, de forma a que a radiação emitida por eles não altere os resultados do ensaio.

Nebulosidade

As nuvens reflectem a radiação infravermelha, atrasando a transferência de calor para o exterior. As medições durante o período nocturno devem ser efectuadas em períodos de pouca ou nenhuma nebulosidade, de forma a assegurar que a transferência de energia ocorre de forma mais eficaz.

Velocidade do vento

Os ventos fortes têm um efeito de arrefecimento e, conseqüentemente, reduzem as temperaturas superficiais. Os ensaios termográficos não se devem realizar se a velocidade do vento for superior a 25 km/h [2].

Humidade

A humidade tende a dispersar o calor na superfície, e oculta os diferenciais térmicos [2]. Este fenómeno vai alterar a transmissão de calor no local onde ocorre, provocando o arrefecimento por intermédio da evaporação na superfície.

Existem outros factores que podem ter influência nas medições, e que são difíceis de precaver ou contrariar. A Poluição do ar nem sempre é perceptível, no entanto se pode alterar a forma como a energia se propaga através do ar [10]. A mudança repentina das condições climáticas pode inviabilizar os resultados de um ensaio, por exemplo um súbito aumento da velocidade do vento pode arrefecer a superfície sob análise.

3. TÉRMICA DE EDIFÍCIOS

3.1. Transmissão de calor em edifícios

O estudo da transmissão de calor assenta nas leis e princípios básicos da termodinâmica. A transmissão de calor entre dois pontos irá ocorrer sempre que se estabelecer uma diferença de temperatura entre eles. Esta transferência de energia ocorre sob a forma de um fluxo de calor entre os pontos, no sentido do elemento com maior temperatura para o de menor.

A transmissão de calor pode ocorrer segundo três fenómenos distintos, nomeadamente, Condução, convecção e radiação.

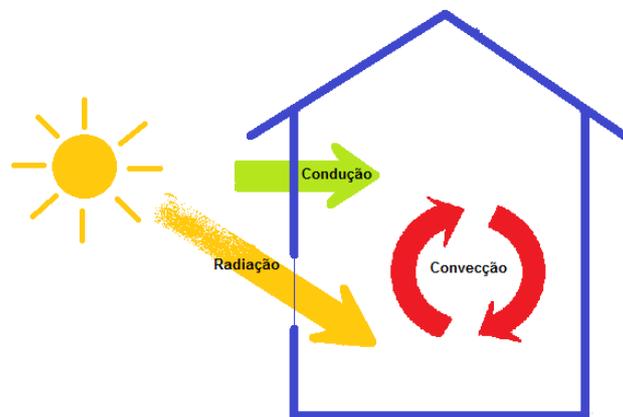


Figura 3.1 - Mecanismos de transmissão de calor.

3.1.1. Condução

A transmissão de calor por condução ocorre através da transferência de energia cinética a nível molecular em elementos sólidos, líquidos ou gasosos. Esta transferência ocorre quando existe contacto entre corpos ou substâncias com diferentes temperaturas, por meio de movimentos e choques entre as partículas de ambos. O fluxo de calor pode ser calculado matematicamente através da Lei de Fourier. Para o caso unidimensional, quando o diferencial de temperatura ocorre somente segundo a direcção X, o fluxo de calor é dado por:

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (4.1)$$

Em que:

λ – Condutibilidade térmica do material (W/m.°C)

A – Área da superfície (m^2)

$d\theta$ – Diferença de temperatura entre duas partículas.

dX – Distância entre as partículas (m)

A propagação do calor ocorre através dos materiais conforme a sua condutibilidade térmica. Esta define-se como a capacidade que estes têm para conduzir o calor, e traduz-se através da quantidade de calor (Q) transmitida através da espessura (e), na direcção normal à superfície de área (A), devido ao diferencial de temperatura ($\Delta\theta$) que se estabelece entre as suas fronteiras, expressa da seguinte forma:

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{d\theta}{e} \quad (4.2)$$

Em que:

λ – Condutibilidade térmica do material (W/m.°C)

A – Área da superfície (m^2)

$\Delta\theta$ – Diferença de temperatura entre fronteiras.

e – Espessura do elemento (m)

No entanto os elementos de construção não são homogéneos, mas sim constituídos por diversos elementos, com propriedades distintas. No caso de uma parede considera-se que esta se trata de um elemento, composto por vários elementos dispostos em série perpendicularmente ao fluxo de calor que os atravessa desde o interior até ao exterior.

Neste caso, o fluxo de calor é dado pela seguinte expressão:

$$q = \frac{\theta_i - \theta_e}{\sum_{j=1}^n R_j} [W/m^2] \quad (4.3)$$

Em que:

θ_i – Temperatura no interior (°C)

θ_e – Temperatura no exterior (°C)

R_j – Resistência térmica do elemento j ($m^2 \cdot °C/W$)

Sendo que:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (4.4)$$

Existem locais da envolvente de um edifício que são compostos por elementos que além de diferentes propriedades apresentam diferentes áreas, dispostos em paralelo relativamente ao sentido do fluxo de calor. Para estes casos assume-se que o fluxo de calor total é igual à soma do fluxo de calor individual de cada elemento. Nestes casos o fluxo de calor pode ser calculado através da expressão:

$$Q = \sum_j \frac{A_j}{R_j} \cdot (\theta_i - \theta_e) [W] \quad (4.5)$$

Em que:

A_j – Área do elemento j (m^2)

R_j – Resistência térmica do elemento j ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)

θ_i – Temperatura no interior ($^\circ C$)

θ_e – Temperatura no exterior ($^\circ C$)

3.1.2. Convecção.

A convecção é o mecanismo de transmissão de calor típico dos fluidos. No caso da térmica de edifícios o fluido relevante é o ar, e é através deste que ocorrem as trocas de calor. Estas trocas de calor podem ocorrer devido a diferenças de pressão originadas por gradientes térmicos (convecção natural), como é o caso de uma corrente ascensional junto de um radiador, ou então devido a diferenças de pressão com origem em causas externas (convecção forçada), como a acção do vento, ou um sistema de condicionamento do ar. As trocas de calor por convecção podem ser de dois tipos, nomeadamente, convecção ar-sólido, que ocorre entre as faces dos elementos e o ambiente em contacto com elas (interior ou exterior), e convecção ar-ar, que ocorre entre massas de ar a diferentes temperaturas. No caso da convecção ar-sólido as trocas de calor são determinadas por intermédio da lei de Newton:

$$Q = h_c \cdot A \cdot (\theta_s - \theta_f) [W] \quad (4.6)$$

Em que:

h_c – Condutância térmica do material ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)

A – Área da superfície em contacto com o fluído (m^2)

θ_s – Temperatura da superfície da envolvente ($^\circ C$)

θ_f – Temperatura do ar ($^\circ C$)

No caso da convecção ar-ar, o fluxo de calor é dado pela seguinte expressão:

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot R_{ph} \cdot V \cdot (\theta_f - \theta_s) [W] \quad (4.7)$$

Em que:

ρ – Massa específica do ar (Kg/m^3)

C_p – Calor específico do ar ($Kj/^\circ C$)

R_{ph} - Taxa de renovação do ar do local

V – Volume do local (m^3)

$(\theta_f - \theta_s)$ – Diferença de temperatura entre os ambientes interior e exterior

3.1.3. Radiação

A transmissão de calor por radiação ocorre devido à propagação de ondas electromagnéticas. Ao contrário da transmissão por condução ou convecção, este processo não necessita de um suporte físico, uma vez que a sua propagação dá-se através do vácuo. Todos os corpos emitem, e absorvem radiação electromagnética, sendo que a intensidade com que se dá esta emissão de energia depende da temperatura absoluta do corpo e do estado da sua superfície.

Tal como descrito no capítulo anterior, cada corpo ou superfície possui uma emissividade própria, que define a capacidade deste para emitir radiação. Um corpo que funciona como um emissor perfeito, emitindo a totalidade da radiação que nele incide é denominado de corpo negro. A quantidade de calor radiado por um corpo negro pode ser calculada através da expressão determinada por Stefan e Boltzmann, tendo em conta o local onde se dá a propagação de energia.

No caso de se considerar a emissão livre para o espaço, utiliza-se a seguinte expressão:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 [W] \quad (4.8)$$

No caso de se considerar a emissão de um corpo à temperatura T , para outro corpo a temperatura T_c , então utiliza-se a expressão:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_c^4) [W] \quad (4.9)$$

Em que:

ε – emissividade da superfície

σ – Constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

A – Área da superfície emissora (m^2)

T – Temperatura absoluta da superfície emissora (K)

T_c - Temperatura absoluta da superfície receptora (K)

3.2. Coeficiente de transmissão térmica

A envolvente de um edifício é composta por diversos elementos, que por sua vez são constituídos por diferentes materiais. As trocas de energia que ocorrem através da envolvente, são definidas através do coeficiente de transmissão térmica, que quantifica a capacidade de um elemento em ser atravessado por um fluxo de calor, provocado por um diferencial de temperatura entre dois ambientes separados por esse elemento. Este coeficiente que é representado pela letra U , vem definido no RCCTE como a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária de um elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele separa, e vem expresso em $W/m^2 \cdot ^\circ C$. O valor do coeficiente de transmissão térmico é calculado a partir da seguinte expressão:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (4.10)$$

Em que:

R_{si} – Resistência térmica superficial interior

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior

R_j – Somatório das resistências dos elementos que constituem o elemento

Os parâmetros da resistência térmica superficial surgem devido ao efeito da transmissão de calor por convecção e radiação, cujo efeito combinado dá origem a zonas onde o fluxo de calor encontra resistência no contacto com a superfície. Os valores da resistência térmica superficial estão definidos no quadro VII.1 do RCCTE.

3.3. Pontes térmicas

O conceito de ponte térmica vem definido na norma EN ISO 10211 [20], como qualquer zona da envolvente de um edifício em que a resistência térmica seja significativamente alterada. As causas para esta alteração podem ser devidas à existência de materiais com diferentes condutibilidades térmicas, ou à alteração da geometria em determinadas zonas da envolvente, como é o caso das ligações entre diferentes elementos construtivos.

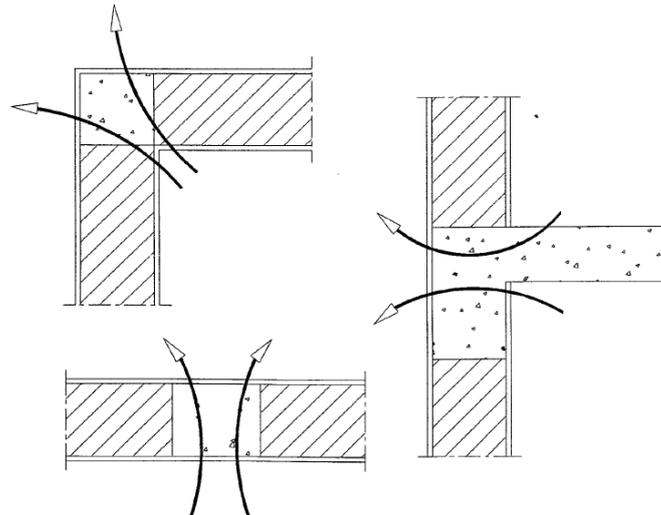


Figura 3.2 - Exemplos de pontes térmicas [7]

O fluxo de calor segue sempre no sentido do elemento com menor resistência à sua passagem. Em zonas de ponte térmica não existe uniformidade da resistência térmica dos elementos, ou seja, nestas zonas, as heterogeneidades existentes provocam alteração na direcção das linhas de fluxo de calor (Figura 3.3) que deixam de ser rectilíneas, e tomam a direcção mais favorável à sua passagem. Desta forma o fluxo de calor perde a sua unidireccionalidade, assumindo um comportamento bidireccional ou tridireccional.

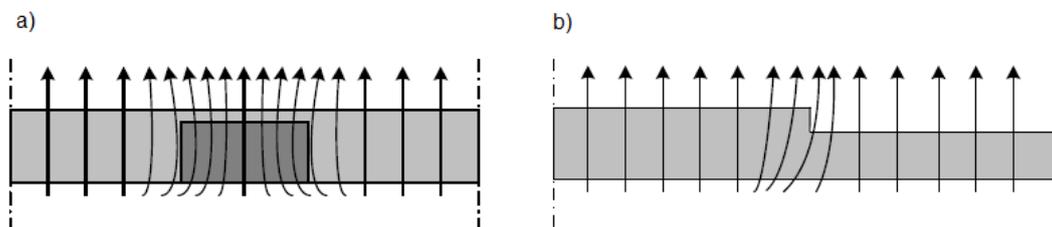


Figura 3.3 - Pontes térmicas devido à transição entre materiais a), e devido à alteração da espessura do elemento b).

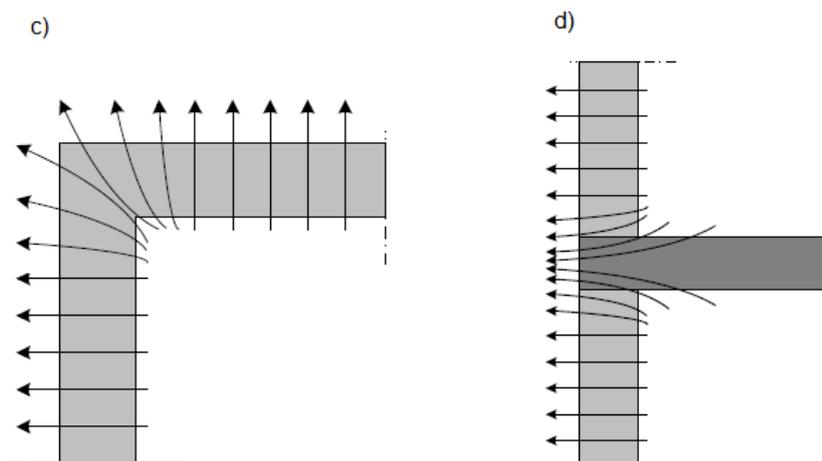


Figura 3.4 - Pontes térmicas devido a diferença entre área interna e externa c), e devido a diferentes elementos de ligação d).

No que diz respeito à classificação, as pontes térmicas são geralmente divididas em pontes térmicas lineares ou bidimensionais, e pontes térmicas pontuais ou tridimensionais. As pontes térmicas lineares são as que ocorrem devido à ligação entre dois elementos estruturais de planos diferentes, como é o caso da ligação entre duas paredes verticais, ou entre fachada e laje intermédia (Figura 3.4). A este tipo de ponte térmica está sempre associado um coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ), expresso em $W/m.^{\circ}C$. As pontes térmicas pontuais ocorrem geralmente da intersecção entre pontes térmicas lineares, em pontos onde se cria um vértice, como por exemplo, nos vértices da envolvente onde se encontram dois elementos verticais e um horizontal. Às pontes térmicas pontuais está sempre associado um coeficiente de transmissão térmica pontual (χ) expresso em $W/^{\circ}C$.

Nas zonas de ponte térmica ocorre uma maior concentração das linhas de fluxo, o que resulta numa maior perda de calor para o exterior. Esta perda de calor vai provocar uma redução das temperaturas superficiais, relativamente às zonas correntes, podendo dar origem a anomalias.

3.3.1. Anomalias associadas às pontes térmicas

A existência de pontes térmicas na envolvente de um edifício é frequentemente apontada como uma das causas mais comuns para a ocorrência de diversas anomalias, nomeadamente:

- Acréscimo de perda térmica;
- Agravamento do risco de condensações superficiais internas;
- Desenvolvimento de bolores;
- Heterogeneidade de temperaturas superficiais;
- Degradação de revestimentos.

Acréscimo de perda térmica

Durante a estação de arrefecimento, a existência de pontes térmicas na envolvente de um edifício, irá resultar no aumento da transmissão de calor para o exterior. Este acréscimo de perda térmica vai comprometer o conforto térmico no interior, resultando num aumento das necessidades energéticas.

Agravamento do risco de condensações superficiais internas

O ar no interior de um edifício é composto por uma determinada percentagem de vapor de água, que depende da produção de vapor no local, da ventilação e da quantidade de vapor transportada pelo ar exterior. O arrefecimento de uma massa de ar pode provocar condensações de vapor de água, sempre que seja atingido o limite de saturação correspondente a uma dada temperatura. No caso do interior dos edifícios o arrefecimento ocorre de forma localizada junto aos paramentos das paredes exteriores, em particular nas zonas de ponte térmica, como é o caso da generalidade dos elementos estruturais. Durante a estação de arrefecimento as faces interiores das paredes exteriores encontram-se, em geral, a uma temperatura inferior à do ar ambiente, dando origem ao aumento da humidade relativa da camada de ar em contacto com as paredes, dando origem a condensações [27]. A presença de humidade nestas zonas vai dar origem a bolores, e à degradação dos revestimentos.

Desenvolvimento de bolores

Para o aparecimento e desenvolvimento de bolores numa superfície, basta que se reúnam determinadas condições, como, quantidade suficiente de oxigénio, temperatura adequada (entre os 5 e os 25°C, sem variações bruscas), um fundo nutriente apropriado, humidade suficiente (fornecida com regularidade, mantendo a humidade à superfície), ausência de sol, e ar calmo.

Geralmente os bolores desenvolvem-se em cantos (zonas de pontes térmicas), ou atrás do mobiliário, uma vez que nestes locais o ar é mais calmo e a luz solar não incide. O fundo nutriente necessário ao seu desenvolvimento são pequenas quantidades de matéria orgânica, como açúcares, gorduras e, sobretudo celulose. Esta matéria orgânica encontra-se na grande maioria dos edifícios, na forma de papel de parede, cola e certos tipos de pintura [7].

As zonas de pontes térmicas são assim locais propícios ao desenvolvimento deste tipo de fungo, que para além do desconforto visual, pode provocar danos ao nível dos acabamentos, e consequências nefastas para a saúde.

Heterogeneidade de temperaturas superficiais

Uma ponte térmica dá origem a um abaixamento da temperatura superficial interior da envolvente. Este abaixamento vai criar uma heterogeneidade das temperaturas superficiais, o que a partir de uma determinada amplitude pode ter consequências desagradáveis, dando origem ao aparecimento de manchas, alterações diferenciadas de tintas e revestimentos, e a fissuração. As manchas resultam da deposição desigual de pó nas diferentes zonas da superfície interior da envolvente. Nas zonas mais frias o pó fica mais facilmente retido, aparecendo à superfície do revestimento como que uma imagem dos elementos construtivos [7].

Degradação de revestimentos

Todos os factores descritos anteriormente vão provocar a degradação dos revestimentos. A presença de humidade é particularmente nociva, uma vez que provoca alteração das propriedades físicas, alterando a condutibilidade térmica dos mesmos. Para além das implicações ao nível do desempenho, a degradação dos revestimentos provoca desconforto visual.

3.4. Conforto térmico

Na fase de projecto de construção de uma nova edificação, devem ser cumpridas as exigências ao nível do conforto térmico, de forma a que o ambiente térmico no interior da habitação seja agradável durante o período de inverno, assim como no período de verão, sem que para tal sejam necessários grandes encargos a nível energético. O conforto térmico de uma habitação afecta directamente o bem-estar e a saúde dos seus ocupantes.

O conforto térmico pode ser quantificado, de acordo com uma série de parâmetros que devem obedecer a patamares mínimos. O RCCTE defende o conforto térmico como sendo um direito adquirido de todos os cidadãos, e estabelece regras que são aplicáveis a todos os edifícios habitacionais.

A entrada em vigor do Decreto-Lei N° 118/2013 de 20 de Agosto, veio promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios, através da implementação do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE). De acordo com o documento, o Certificado Energético, é obrigatório em qualquer acção que envolva compra, venda, e locação financeira ou arrendamento de imóveis em Portugal [22]. O Certificado Energético contém informações sobre as características construtivas do imóvel, referindo a constituição da envolvente, assim como equipamentos utilizados na climatização e produção de águas quentes sanitárias. As exigências energéticas destes equipamentos também são quantificadas, existindo um limite máximo que não pode ser ultrapassado.

O conforto térmico numa habitação é alcançado quando as trocas de calor entre os ocupantes e o espaço envolvente se processam sem que os corpos tenham de produzir ou perder grandes quantidades de calor no processo. O calor produzido pelos corpos é variável, consoante o tipo de actividade desenvolvida, a idade e o próprio sexo, sendo que um homem produz em média mais calor do que uma mulher na execução da mesma actividade. Este calor é trocado com o ambiente exterior através de condução, convecção, radiação e evaporação. Assim sendo podemos definir os seguintes parâmetros ambientais que influenciam directamente o conforto térmico:

- Temperatura do ar;
- Velocidade do ar;
- Humidade do ar;
- Temperatura média radiante.

A temperatura do ar influencia a perda de calor dos corpos, por convecção e por evaporação. A temperatura do ar ideal, é de acordo com o RCCTE de 20°C durante o verão, e de 25°C e 50% de humidade relativa durante o inverno.

O processo de renovação do ar num espaço é designado por ventilação. A ventilação de um espaço fechado é importante para manter a qualidade do ar nesse mesmo espaço. A velocidade do ar representa a taxa de circulação de ar num determinado ponto, independentemente da direcção, e influencia directamente o conforto térmico, na medida em que promove as trocas de calor entre a pele e o meio envolvente, através de evaporação e convecção. A taxa estabelecida pelo RCCTE é de 0,6 renovações de ar por hora, de forma a manter a qualidade do ar interior.

A humidade do ar, ou humidade relativa do ar, corresponde à percentagem de vapor de água contida na massa de ar. A humidade relativa não tem uma grande influência no conforto térmico, excepto em situações extremas, pelo que esta se deve estar compreendida entre os 35% e os 85%.

A temperatura média radiante é a temperatura média das superfícies envolventes de um espaço. Esta pode ser superior, ou inferior à temperatura do ar nesse espaço. Este parâmetro influencia o calor perdido por fenómenos de radiação, e de condução através do contacto entre o corpo e superfícies mais frias. As grandes variações de temperatura num determinado ambiente provocam desconforto térmico, sendo que estas variações não deveriam ultrapassar os 5°C no sentido vertical, e os 10°C no sentido horizontal.

4. ANÁLISE NUMÉRICA

4.1. *Software* de modelação BISCO

O *software* BISCO (Physibel, 2006) é um programa de análise numérica, que efectua a análise térmica de objectos bidimensionais, constituídos por diversos materiais e sujeitos a diferentes condições de fronteira. O programa utiliza ficheiros em formato bitmap (Bmp), associando as cores do bitmap às propriedades físicas dos materiais representados.

O programa permite determinar o coeficiente de transmissão térmica dos vários elementos construtivos, quantificar as perdas de calor através das zonas de ponte térmica, calcular o coeficiente de transmissão térmica linear, determinar o risco de ocorrência de condensações superficiais, avaliar o desempenho térmico de janelas, portas, e estores, e quantificar a transferência de calor através do solo [13].

Todas as propriedades são calculadas tendo por base as seguintes normas europeias:

EN ISO 10211:2007 – Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations.

EN ISO 6946:2007 – Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method.

EN ISO 10077-2 – Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2 - Numerical method for frames.

ISO 13370:2007 – Thermal performance of buildings – Heat transfer via the ground – Calculation methods.

O BISCO, tal como referido anteriormente funciona com ficheiros do tipo bitmap. Para tal o programa vem acompanhado de uma ferramenta auxiliar, o BiscoDxf que converte um pormenor construtivo desenhado em AUTOCad formato Dxf, num ficheiro do tipo bitmap. Na fase de construção do bitmap é importante que no BiscoDxf os diferentes materiais fiquem bem definidos, cada qual com a sua respectiva cor, uma vez que depois o programa BISCO vai atribuir as propriedades com base nas cores do bitmap.

Após a abertura do ficheiro bitmap, o programa divide-se em quatro janelas, nas quais se vão introduzir as informações acerca do pormenor construtivo.

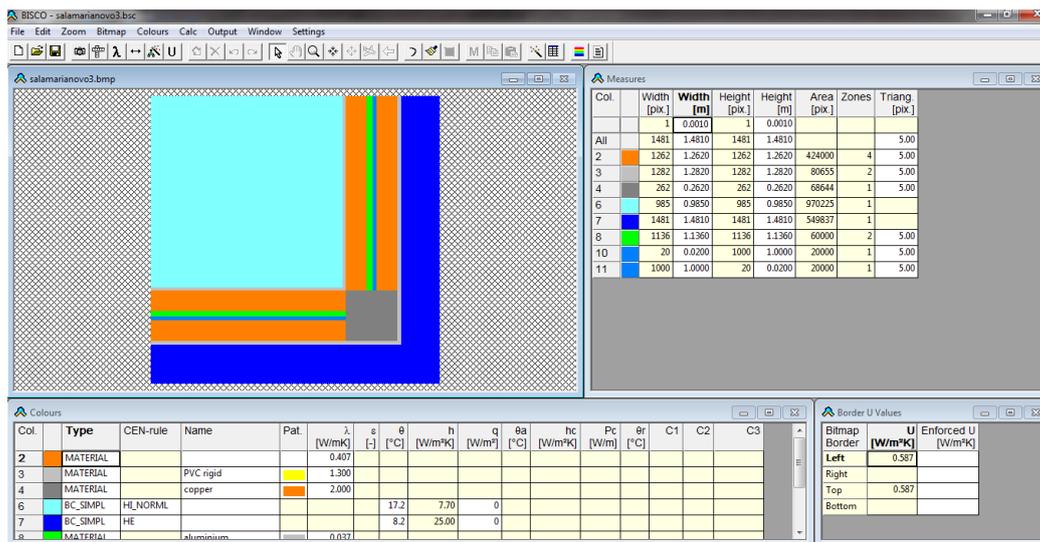


Figura 4.1 - Programa BISCO.

A janela de maior dimensão apresenta uma representação do pormenor num desenho em duas dimensões. A janela do lado direito, denominada “measures” indica as dimensões de cada um dos elementos que constituem o pormenor. É importante ter atenção à escala definida logo na primeira linha desta janela, que indica a que distância corresponde cada píxel, de forma a garantir, que as medidas definidas correspondem às medidas reais.

A janela inferior esquerda, denominada “colours” é a janela onde se definem a cor, o nome, o tipo de material utilizado e as regras aplicáveis a cada um dos elementos. Os materiais utilizados como, por exemplo, a alvenaria de tijolo ou o betão armado são definidos com o tipo “MATERIAL” e para estes são definidos os respectivos valores de condutibilidade térmica (λ) em W/mK. Aos ambientes interior e exterior atribuí-se o tipo “BC_SIMPL” (simplified boundary condition), que define as condições de fronteira para estas zonas, ficando definidas com a regra HI_NORMAL, e HE para o interior e exterior respectivamente. Para as condições de fronteira, é necessário definir a condição que as caracteriza, que neste caso é a temperatura em cada um dos ambientes.

Em pormenores construtivos em que estão representados espaços de ar, como por exemplo uma caixa de ar, ou uma outra cavidade, o programa permite efectuar a divisão destes espaços, e calcular a condutividade térmica através de cada um deles, com base no sentido do fluxo de calor que atravessa o elemento. Assim sendo é necessário definir os espaços de ar com o tipo “EQUIMAT” (equivalent material) e definir o sentido do fluxo de calor que atravessa o elemento. Após a definição do sentido do fluxo de calor, o programa define automaticamente o valor para a condutibilidade térmica de cada cavidade. A última janela, que se encontra no canto inferior direito, denominada “Border U Values” indica o coeficiente de transmissão térmica do elemento contacto com cada margem do bitmap.

4.2. Cálculo do fluxo de calor, coeficiente de transmissão térmica e coeficiente de transmissão térmica linear.

Após a definição criteriosa das propriedades de todos os materiais, o programa está em condições de efectuar o cálculo do modelo. Tendo por base o método dos elementos finitos, o programa executa a discretização do pormenor construtivo numa malha composta por elementos triangulares, e calcula a temperatura em cada nó da malha. Analisando os resultados, o programa determina a temperatura em cada elemento do pormenor construtivo, e fornece os dados sob a forma de texto (Figura 4.2), e através de um output gráfico, que traduz as diferentes temperaturas de cada elemento, através de um sistema de cores (Figura 4.3). Para a determinação das propriedades dos materiais foram utilizadas as tabelas de referência, do documento do LNEC –ITE 50 [23].

Quadro 4.1 – Condutibilidade térmica dos materiais. Adaptado de [23].

Material	Condutibilidade térmica (W/m.°C)	Referência (ITE 50, 2006)
Isolamento térmico (EPS)	0,037	Quadro I.1
Argamassa tradicional	1,3	Quadro I.2
Reboco tradicional	1,3	Quadro I.2
Revestimento de ladrilho cerâmico	1,3	Quadro I.2
Betão armado	2	Quadro I.2
Betonilha de regularização	1,3	Quadro I.2
Malhasol	50	Quadro I.2
Abobadilha cerâmica	0,304	Quadro I.2
Alvenaria de tijolo furado (0,11m)	0,407	Quadro I.5

```

BISCO Calculation Results

BISCO data file: salamaria.bsc

Number of nodes = 30435
Heat flow divergence for total object = 0.000618012
Heat flow divergence for worst node = 0.0574337

Col. Type      Name      tmin      tmax      ta      flow in   flow out
      [°C]      [°C]      [°C]      [W/m]     [W/m]
-----
2 MATERIAL Tijolo      8.45      16.41
3 MATERIAL Reboco     8.30      16.47
4 MATERIAL Argamassa  8.54      16.33
5 MATERIAL Betão      8.46      12.23
6 MATERIAL Caixa de ar 9.53      11.44
7 BC_SIMPL Ambiente Int. 13.55     16.47      14.97     0.00
8 BC_SIMPL Ambiente Ext. 8.30      8.58      0.00      14.97
10 MATERIAL Isolamento 9.85      14.68

Temperature factor (EN ISO 10211) = 0.594
hi = 7.70 W/(m².K)
Rsi = 0.13 m².K/W
Surface condensation if RH > 79 % (at 17.20°C)

Linear thermal transmittance (EN ISO 10211)
psi = Q/(ti-te) - U1*l1 - U2*l2 = 0.421 W/(m.K)
Equivalent thermal transmittance
Ueq = Q/((ti-te)*(l1+l2)) = 0.832 W/(m².K)
Q = 14.970 W/m
ti = 17.20°C
te = 8.20°C
U1 = 0.621 W/(m².K) (left edge of bitmap)
l1 = 1.0000 m (distance no. 1)
U2 = 0.621 W/(m².K) (top edge of bitmap)
l2 = 1.0000 m (distance no. 2)

```

Figura 4.2 - Output de texto do programa BISCO.

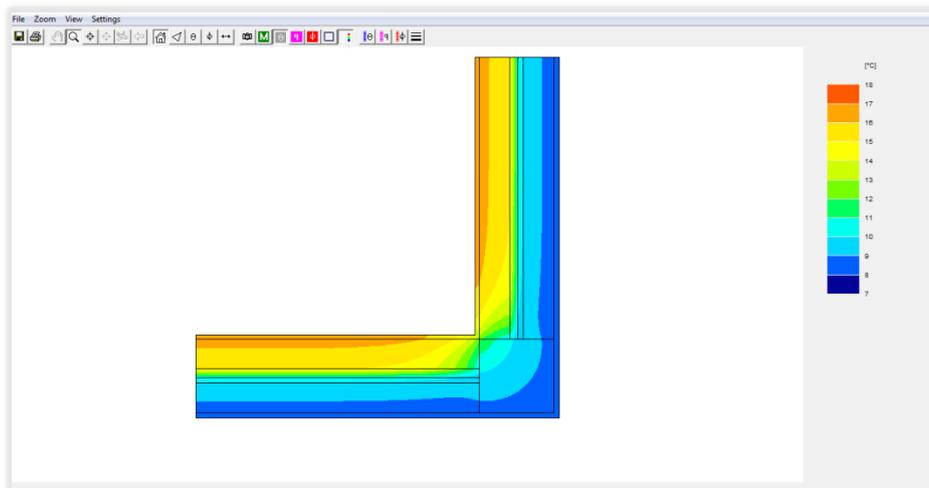


Figura 4.3 - Output gráfico do programa BISCO.

Para além do fluxo de calor que atravessa o pormenor construtivo o programa permite determinar o fluxo de calor que atravessa a zona de ponte térmica. Para calcular um fluxo de calor, é necessário um coeficiente associado a uma diferença de temperatura. Assim sendo é necessário calcular o coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) da ponte térmica, de forma a determinar a quantidade de calor perdido através dessa zona.

De acordo com a norma EN ISO 10211 – 2 [14], para calcular o coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) utilizando um programa de cálculo numérico, é necessário que o pormenor construtivo seja modelado de acordo com determinadas regras. Cada elemento que constitui o pormenor deve ter uma extensão mínima (d_{min}) até à zona de ponte térmica, que não pode ser inferior a 1 metro, e a três vezes a espessura do elemento em causa (figura 4.4). Esta imposição ao nível das dimensões é fundamental para que se dê a estabilização do fluxo de calor ao longo do elemento, permitindo que as linhas de fluxo de calor assumam novamente um comportamento unidireccional (figura 4.5).

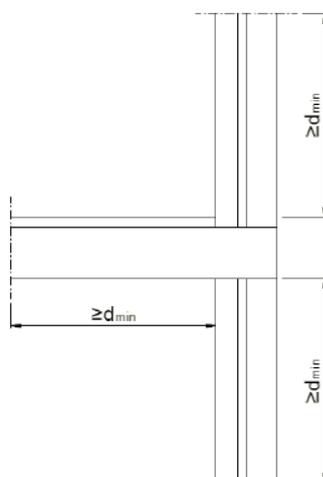


Figura 4.4 - Posicionamento dos planos de corte à distância d_{min} da ponte térmica [14].

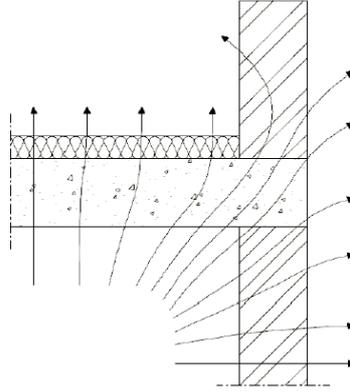


Figura 4.5 - Linhas de fluxo [14].

O fluxo de calor que atravessa uma ponte térmica é dado pela seguinte equação:

$$Q = \Psi B(\theta_i - \theta_e) \quad (5.1)$$

Em que:

Ψ – Coeficiente de transmissão térmica linear (W/m.°C)

B – Dimensão linear da ponte térmica (m)

θ_i – Temperatura do ambiente interior (°C)

θ_e – Temperatura do ambiente exterior (°C)

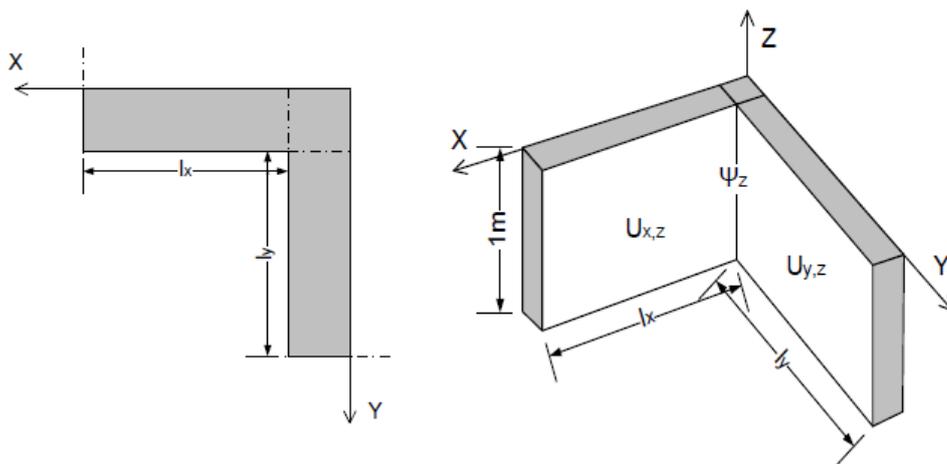


Figura 4.6 - Exemplo de uma ponte térmica em zona de cumeeira [14].

Considerando o pormenor representado na figura 4.6, sujeito a um diferencial de temperatura $\Delta\theta = (\theta_i - \theta_e)$, o fluxo de calor que atravessa o pormenor por unidade de comprimento z , contabilizando o acréscimo provocado pela zona de ponte térmica, é dado por:

$$Q = \Psi_z \times \Delta\theta + U_{X,Z} \times l_x \times \Delta\theta + U_{Y,Z} \times l_y \times \Delta\theta \quad (5.2)$$

Em que:

$U_{X,Z}$ – Coeficiente de transmissão térmica segundo a direcção X ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

$U_{Y,Z}$ – Coeficiente de transmissão térmica segundo a direcção Y ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

l_x – Comprimento do elemento segundo a direcção x (m)

l_y – Comprimento do elemento segundo a direcção y (m)

Dividindo o fluxo de calor Q pelo diferencial de temperatura, obtém-se o coeficiente de transmissão térmica linear, associado à ponte térmica da zona do cunhal (L^{2D}):

$$L^{2D} = \frac{Q}{\Delta\theta} = \Psi_z + U_{X,Z} \times l_x + U_{Y,Z} \times l_y \quad (5.3)$$

Sendo o coeficiente de transmissão térmica linear dado por:

$$\Psi_z = L^{2D} - U_{X,Z} \times l_x - U_{Y,Z} \times l_y \quad (5.4)$$

Ou, para um caso geral dado por:

$$\Psi = L^{2D} - \sum U_i \times l_i \quad (5.5)$$

5. ANÁLISE EXPERIMENTAL

5.1. Descrição da análise

A componente prática deste trabalho incide sobre a análise termográfica do comportamento térmico da envolvente exterior de dois edifícios unifamiliares. Os resultados são depois comparados com os obtidos através de análise numérica.

Os edifícios seleccionados para este trabalho encontram-se na mesma zona e possuem características construtivas semelhantes. A principal diferença reside no facto de um não possuir camada de isolamento térmico na constituição da sua envolvente. Ambos os edifícios foram sujeitos a obras para instalação de um sistema de aquecimento a gasóleo. Os edifícios foram escolhidos devido às semelhanças entre si, e ao facto de apenas um possuir isolamento térmico, o que constitui um factor de interesse adicional, uma vez que permite verificar a influência da presença da camada de isolamento térmico no comportamento do edifício. Para simplificação, os edifícios foram denominados como edifício 1 e edifício 2, de acordo com a ordem pela qual foram analisados.

No caso do edifício 1, foi ainda estabelecida uma comparação entre os valores obtidos para o coeficiente de transmissão térmica linear, e os valores de referência da norma EN ISO 14683:2007 – Thermal bridges in building construction – Linear thermal transmittance – Simplified methods and default values, e do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) para soluções construtivas semelhantes. Para o edifício 2 procedeu-se somente ao cálculo do coeficiente, uma vez que os valores de referência estabelecidos as normas e regulamentos aplicam-se a soluções com isolamento térmico.

5.2. Preparação do ensaio termográfico

Para a realização de uma inspecção termográfica existe toda uma série de requisitos e preparação prévia necessária, com a finalidade de assegurar que os resultados obtidos são fiáveis. Todos os requisitos e medidas estão descritos na Norma Europeia EN 13187:1999 – Thermal performance of buildings, qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method [25].

De forma a preparar o ensaio termográfico foi produzido um guião de com base nesta norma, no qual devem ser escritas informações acerca do edifício, do equipamento utilizado, condições climatéricas e outros factores relevantes para a realização de um ensaio termográfico. Do preenchimento do guião resulta um relatório de ensaio que deve acompanhar o relatório termográfico, uma vez que a informação nele descrita complementa o ensaio.

Encontram-se em anexo o guião para a realização de uma inspecção termográfica (Anexo I), e os relatórios de acompanhamento aos ensaios termográfico realizados nos edifícios (Anexo II e Anexo III).

5.3. Equipamento utilizado

O equipamento utilizado na recolha dos termogramas, foi uma câmara termográfica Flir ThermaCam modelo B4. A radiação é função da temperatura superficial de um objecto. A câmara permite efectuar a medição das temperaturas superficiais de um objecto ou superfície captando a radiação emitida pelo objecto, e fazendo a conversão para uma imagem térmica que pode ser visualizada no ecrã LCD de 2,5”.



Figura 5.1 – câmara termográfica Flir ThermaCam modelo B4 [8].

A utilização da câmara é simples, sendo possível executar a maioria dos comandos usando apenas os botões da consola. O *software* e opções da câmara são controlados através de um sistema de menus, que são operados através dos botões da consola.

As imagens registadas podem ser guardadas na memória interna da câmara, e trabalhadas em tempo real através do *software* da câmara, ou com recurso a um computador portátil utilizando o programa ThermaCam Reporter da FLIR Systems. Este modelo de câmara apresenta as seguintes características:

Quadro 5.1 - Especificações da Flir ThermaCam modelo B4.

Desempenho de imagem

Foco	Manual
Tempo de “start-up”	Aproximadamente 15 segundos
Tempo de “start-up” a partir do modo de suspensão	< 1 segundo a +25°C
Detector	Matriz de plano focal não arrefecido (microbolómetro) 320 x 240 pixels
Faixa espectral	7,5 – 13 µm

Apresentação de imagem

Ecrã	LCD a cores 2,5”, 16-bit
Saída de sinal de vídeo	Sinal de vídeo composto CVBS (ITU-R BT.470 PAL/SMPTE 170M NTSC)

Temperatura

Faixa de temperatura	-20 °C até 120 °C
Precisão	± 2 °C ou ± 2% do valor de leitura

Laser

Classificação	Classe 2
Tipo	Laser de Díodo ALGaInP Semicondutor 1mW/635 nm (vermelho)

Sistema eléctrico

Tipo de bateria	Bateria recarregável Li/Ion
Tempo de utilização da bateria	Uma hora e meia
Fonte de alimentação	Adaptador AC: 90-260V, 50/60 Hz, DC 12V
Voltagem	DC 11-16V
Poupança de energia	Desliga-se automaticamente, modo de “stand-by” manual

Especificações gerais

Peso	0,800kg, incluindo bateria e lente de 27,4 mm
Dimensões (C x L x A)	259 x 80 x 135 mm

Corpo da câmara	Plástico e borracha
Temperatura de funcionamento	-15 a +45°C
Temperatura de armazenamento	-40 a 70°C
Protecção às agressões do ambiente	IP54
Choque	25 g, IEC 68-2-29
Vibração	2 g, IEC 68-2-6
Conectividade (USB)	Transferência de imagem para o PC USB Rev 2.0 (12 Mbit)

5.4. Cálculo da emissividade e da temperatura ambiente reflectida através do método experimental

A emissividade e a temperatura aparente reflectida são dois dos parâmetros que mais influenciam o valor das medições num ensaio termográfico. No âmbito da realização deste trabalho ambos foram calculados através de ensaios, de execução relativamente simples.

5.4.1. Método experimental para a determinação da temperatura aparente reflectida

A temperatura medida através de uma câmara termográfica numa determinada superfície, é afectada pelo meio ambiente que a rodeia. Uma vez que todos os objectos imitem radiação, parte da radiação emitida por uma superfície corresponde à radiação imitada pelos objectos que a rodeiam.

A determinação da temperatura aparente reflectida pelo ambiente numa determinada superfície, pode ser calculada através de um ensaio simples, recorrendo a uma folha de alumínio e a um pedaço de cartão. A metodologia seguida é a descrita na ASTM: E 1862-97 Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature using Infrared Imaging Radiometers [12].

Para a realização deste ensaio é necessário criar um objecto reflector com reflectividade muito elevada, o mais próximo de 1 possível. A folha de alumínio cumpre este requisito, no entanto não apresenta a consistência necessária para ser utilizada como reflector. A folha de alumínio na sua forma original apresenta uma superfície plana, e como tal actua como um espelho, o que não serve os propósitos do ensaio. Para criar o reflector a partir da folha de alumínio, o primeiro passo é amachucar a folha de alumínio, e depois reachata-la como ilustra a imagem 3 da Figura 5.2. Ao amachucar a folha de alumínio, esta deixa de funcionar como espelho, sem, no entanto perder as suas propriedades

reflectoras. O passo seguinte passa por envolver o pedaço de cartão com a folha de alumínio, criando assim o reflector.

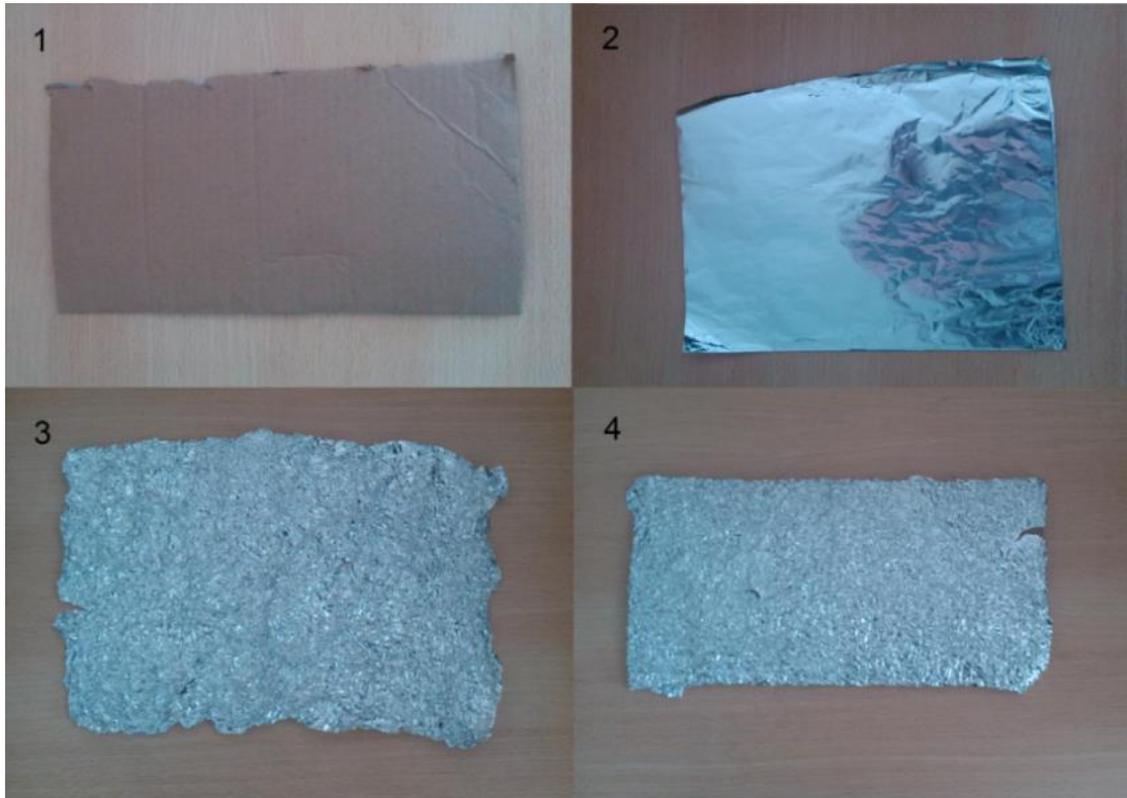


Figura 5.2 - Processo de criação do reflector. (1) Pedaço de cartão, (2) Folha de alumínio, (3) folha de alumínio amarrotada e reachatada, (4) Cartão envolto com a folha de alumínio (reflector).

Para a determinação da temperatura aparente reflectida, colocou-se o reflector paralelamente à superfície analisada (Figura 5.3), e ajustou-se a emissividade da câmara para 1. O reflector foi colocado numa posição perpendicular à câmara, e de seguida foi efectuada a medição da temperatura no reflector (Figura 5.4). O processo foi repetido mais duas vezes e no final o valor assumido para a temperatura aparente reflectida foi a média entre as três medições efectuadas.



Figura 5.3 – Reflector colocado na parede perpendicularmente à câmera.



Figura 5.4 – Medição da temperatura no reflector.

Quadro 5.2 - Resultados da medição da temperatura aparente reflectida.

	Temperatura (°C)
Medição nº1	21,5
Medição nº2	21,1
Medição nº3	21,3
Média	21,3

5.4.2. Método experimental de cálculo da emissividade da superfície

Na recolha dos termogramas realizada no âmbito deste trabalho, foi utilizado o valor de 0,86 para a emissividade das superfícies analisadas. O valor adoptado é o valor tabelado do menu da câmara termográfica, para o tipo de superfície analisada. Ao adoptar o valor tabelado em detrimento de um valor calculado através do método experimental é possível eliminar o erro humano que poderia resultar da determinação experimental in-situ.

Apesar de a escolha ter recaído sobre o valor tabelado para a emissividade, procedeu-se à determinação da emissividade de uma parede através do método experimental.

O método escolhido foi o que vem descrito como “Reference emissivity material method” na norma ISO 18434-1, Condition monitoring and diagnosis of machines – Thermography [26]. Este método prevê a utilização de um material que possua um valor de emissividade conhecido, e que este seja um valor elevado. O mais comum é a utilização de fita isolante preta, cuja emissividade é 0,95.

Para a realização do ensaio foi escolhida uma sala com temperatura constante, e no início do ensaio a temperatura registada era de 20°C. Utilizou-se a fita para cobrir uma área grande o suficiente para preencher o campo de visão do equipamento.

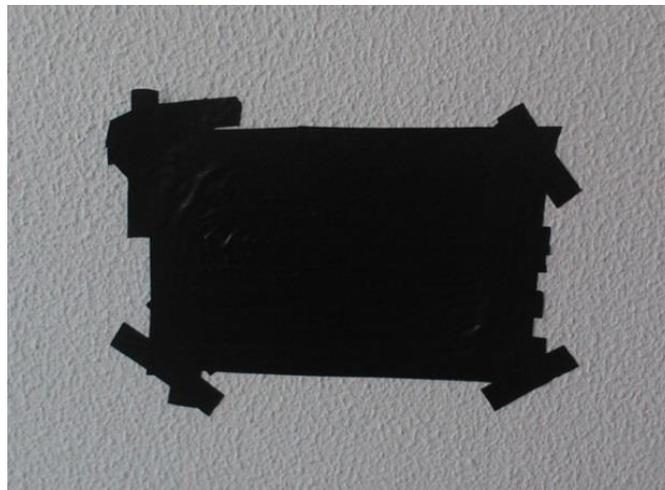


Figura 5.5 - Superfície da parede coberta com fita isolante preta.

Após a colocação da fita, esta foi deixada na parede durante algumas horas, para que as temperaturas estabilizassem, uma vez que logo após a colocação da fita, a sua temperatura é diferente da temperatura da parede, e este método requer que a temperatura do material seja igual à temperatura da superfície.

De seguida colocou-se a câmara na posição para efectuar a medição, e foram introduzidas a emissividade da fita isolante e o valor da temperatura aparente reflectida. A emissividade da fita é 0,95 e no momento da medição a sua temperatura é igual à temperatura da parede. Efectuou-se a medição da temperatura da fita, e registou-se o valor obtido. De seguida efectuou-se a medição da temperatura da superfície adjacente à zona coberta pela fita isolante. Uma vez que a superfície possui uma emissividade diferente da fita, o valor obtido para a temperatura da zona adjacente é diferente. De seguida ajustou-se o valor da emissividade, até o valor da temperatura da superfície, coincidir com o valor obtido para a temperatura da fita. Para minimizar erros de medição, repetiu-se o processo três vezes, e adoptou-se o valor médio como valor para a emissividade da superfície em análise.

Quadro 5.3 - Resultados da medição da emissividade.

	Emissividade
Medição nº1	0,82
Medição nº2	0,84
Medição nº3	0,83
Média	0,83

Este tipo de ensaio é bastante simples, no entanto alguns factores podem resultar em erros de medição. O tempo de espera necessário para a homogeneização das temperaturas entre a superfície e a fita isolante, terá de ser cumprido, caso contrário o valor determinado para a temperatura pode estar errado. A falta de aderência entre a fita e a superfície analisada tem influência nos resultados. No início da realização do ensaio a fita utilizada estava com problemas de aderência à superfície, devido à natureza rugosa da mesma, pelo que teve de se reforçar os cantos da área coberta de forma a manter a aderência entre a fita e a superfície.

5.5. Metodologia

Tendo por base os termogramas recolhidos na análise dos edifícios, foram modelados os pormenores construtivos das zonas estudadas. A partir do programa BISCO, e utilizando as temperaturas interior e exterior que se registaram aquando da realização dos ensaios termográficos, o comportamento térmico destas zonas foi simulado. Estabelecendo uma comparação entre as distribuições de temperatura obtidas com o programa BISCO, e as distribuições de temperaturas registada através da termografia, foi efectuada uma análise comparativa entre os valores obtidos através dos dois métodos.

De forma a seleccionar os pontos para análise, foi colocada em cada zona analisada, uma escala em cartão com marcas espaçadas de 5 centímetros (Figura 5.6), de forma a poder determinar distâncias na imagem. Para cada imagem termográfica foram seleccionados 10 pontos, ilustrativos da temperatura ao longo do pormenor construtivo.



Figura 5.6 - Colocação da escala para determinação dos pontos de análise.

Na análise computacional dos termogramas o programa utilizado foi o FLIR ThermaCam Reporter, que permite a análise pontual das temperaturas.

O programa BISCO permite efectuar a análise da distribuição de temperaturas do pormenor construtivo, apresentando os resultados através de uma distribuição gráfica por intervalos de temperatura, associados a uma cor ou tonalidade. Uma vez que o programa apresenta as temperaturas por intervalos de temperatura, e não pontualmente, foi necessário obter os valores para cada um dos pontos definidos individualmente, compatibilizando as distâncias observadas na escala com as distâncias no pormenor modelado. Para este processo, recorreu-se a uma ferramenta do output gráfico do programa BISCO, que apresenta uma representação das linhas isotérmicas que delimitam os

intervalos de temperatura, sendo desta forma mais fácil determinar a temperatura em pontos específicos, como ilustrado na figura 5.7.

No entanto em certas zonas do pormenor construtivo, como no paramento exterior, onde a variação de temperatura é menor, procedeu-se a um refinamento das linhas isotérmicas, em intervalos menores de temperatura, e com um menor intervalo de temperatura entre elas, como está representado na figura 5.8.

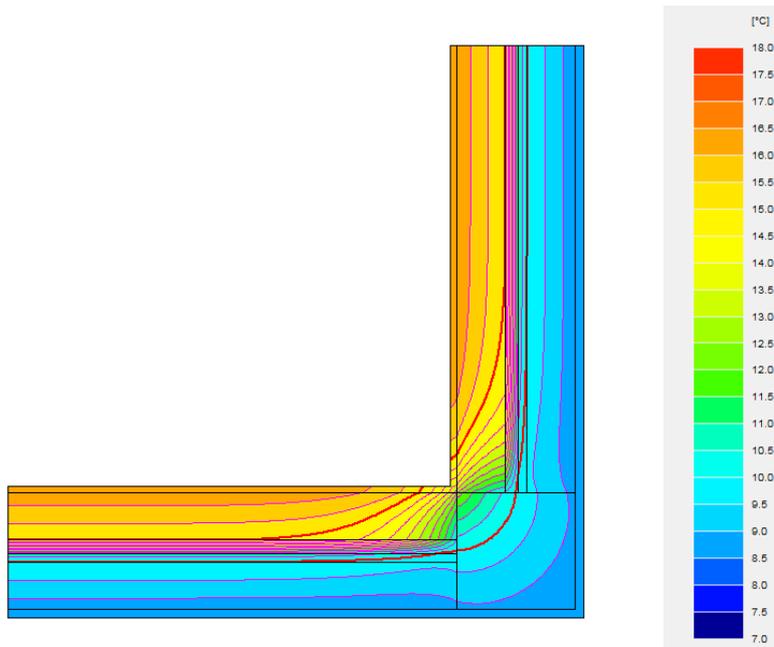


Figura 5.7 - Representação das linhas isotérmicas que atravessam o pormenor construtivo.

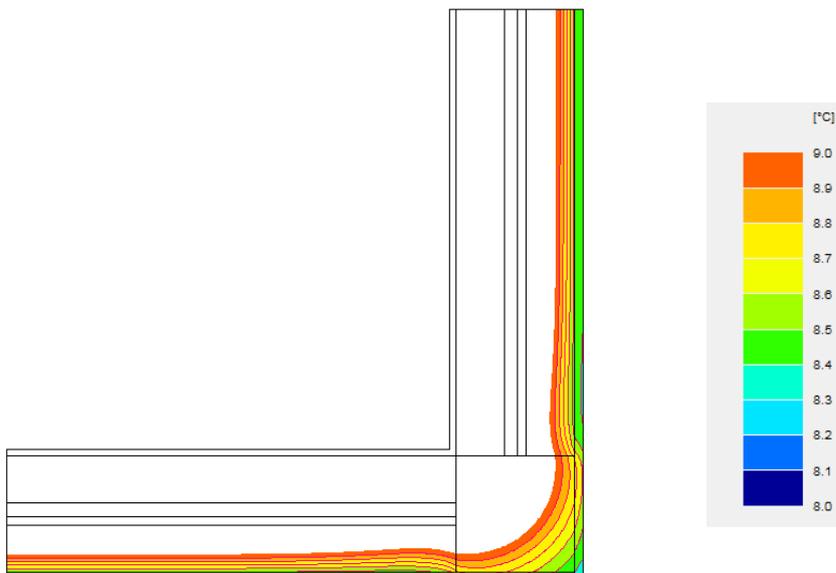


Figura 5.8 - Exemplo de refinamento das linhas isotérmicas no pormenor construtivo.

5.6. Análise dos edifícios

5.6.1. Edifício 1

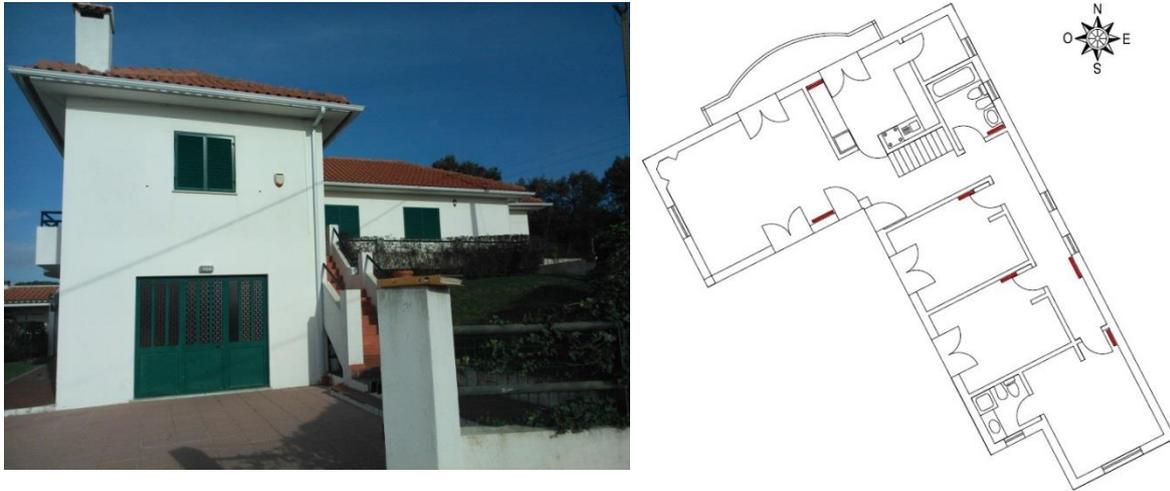


Figura 5.9 – Planta do edifício 1.

O primeiro edifício analisado trata-se de um edifício unifamiliar cuja construção foi concluída no ano de 1993. O edifício é constituído por paredes exteriores duplas, com caixa de ar e isolamento em Poliestireno expandido (EPS) de 2 cm, e paredes interiores simples rebocadas.

O primeiro termograma analisado corresponde ao quarto principal do edifício. O termograma foi obtido na análise pelo interior, e ilustra a distribuição de temperaturas na zona de ligação entre duas fachadas.

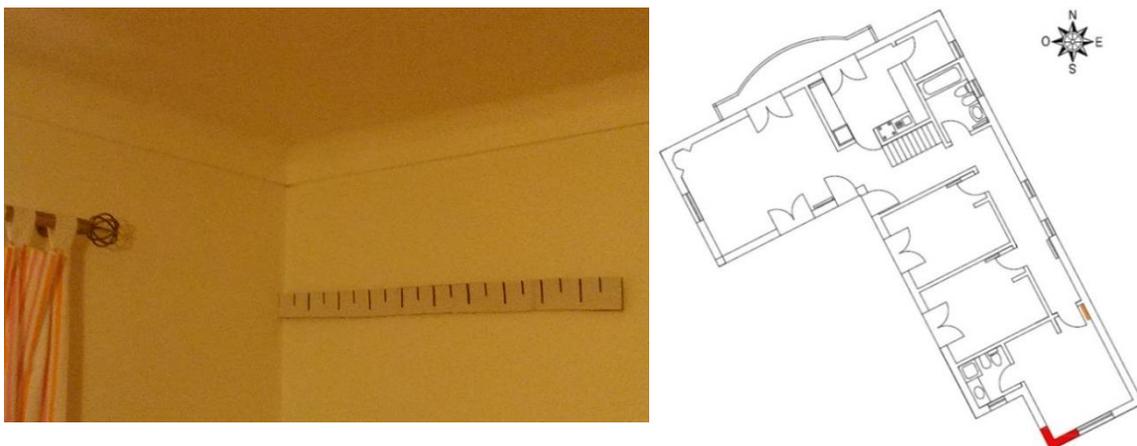


Figura 5.10 - Fotografia da zona interior do quarto, e respectiva localização no edifício.

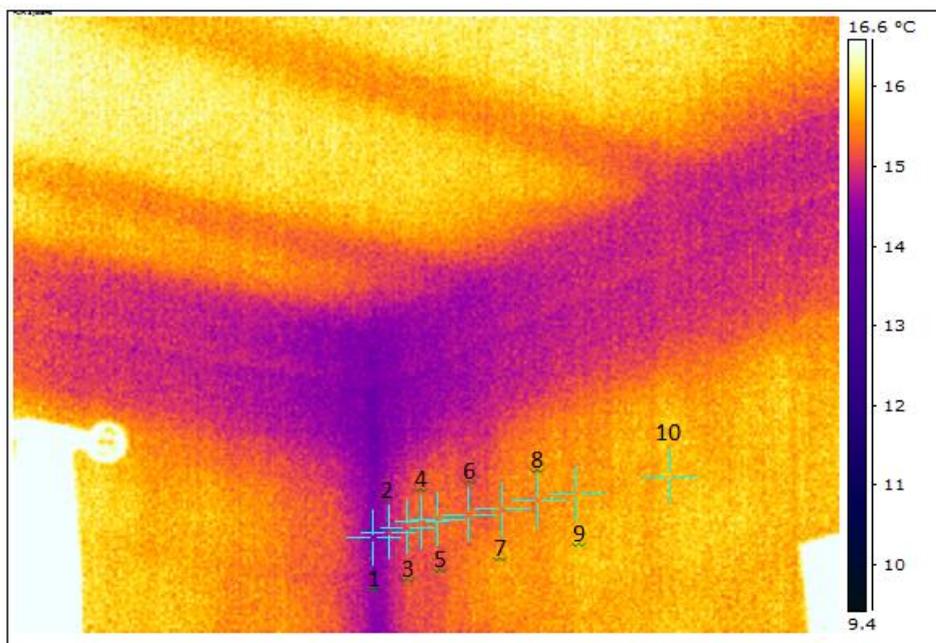


Figura 5.11 - Termograma da zona interior do quarto e respectivos pontos de análise.

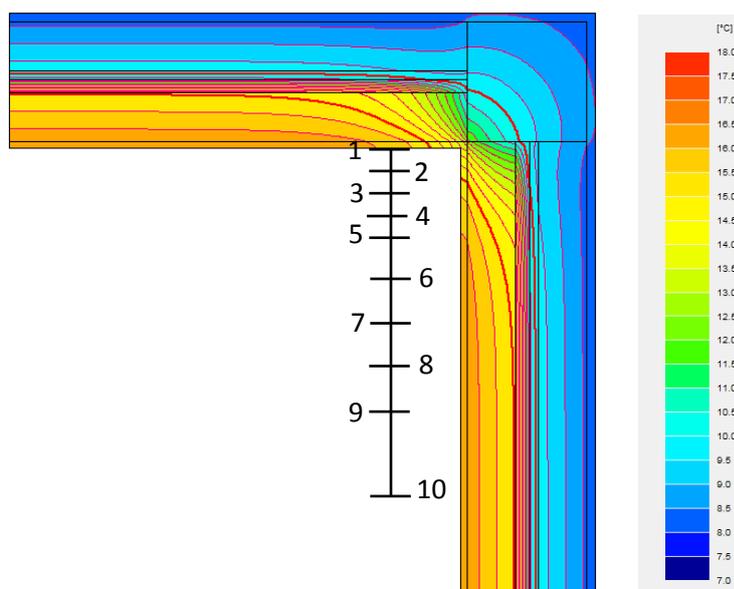


Figura 5.12 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.

Tendo em conta a simetria do pormenor construtivo, os resultados da análise numérica vão ser iguais nos paramentos segundo as direcção X e Y, de modo que se optou por analisar os dados somente segundo uma das direcções. Foram definidos os 10 pontos para análise, sendo que os primeiros 5 pontos apresentam um distanciamento entre eles de apenas 5 cm, de forma a melhor ilustrar o comportamento na zona de ligação entre as paredes, que é a zona onde se regista uma maior variação das temperaturas, comparativamente com a restante zona corrente. Os restantes pontos estão distribuídos pela restante zona corrente, uma vez que a variação da temperatura nesta zona é menor, não havendo necessidade para uma análise tão detalhada.

Quadro 5.4 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Termografia (°C)	14,4	14,9	15,1	15,2	15,2	15,2	15,4	15,3	15,6	15,8
BISCO (°C)	13,6	14,7	15,4	15,7	16,1	16,2	16,3	16,4	16,4	16,4
Diferença (°C)	0,8	0,2	-0,3	-0,5	-0,9	-1	-0,9	-1,1	-0,8	-0,6

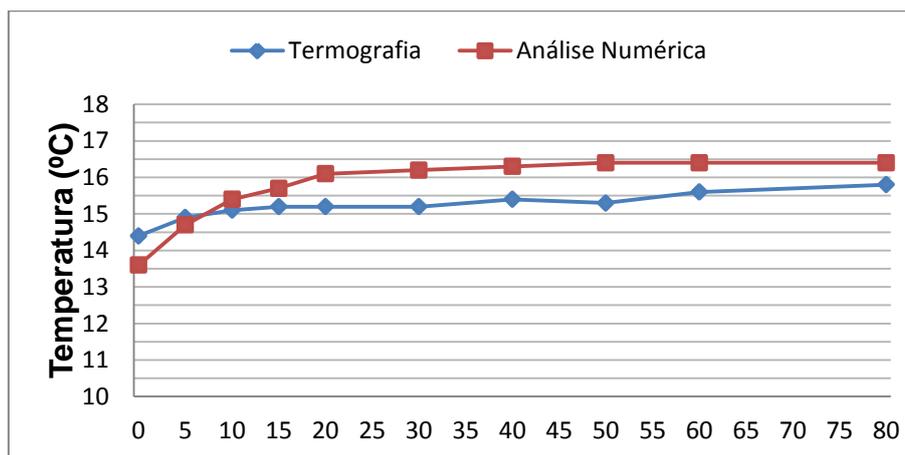


Figura 5.13 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.

A envolvente do edifício apresenta um comportamento semelhante para os dois métodos, sendo que em termos de valores as diferenças não são muito acentuadas. Excepto nos 2 pontos mais próximos da zona de ligação, as temperaturas obtidas por análise numérica foram superiores.

O coeficiente de transmissão térmica linear calculado é superior aos valores de referência, no entanto estes valores correspondem a soluções constructivas simplificadas, e são demasiado conservativos.

Quadro 5.5 – Valores do coeficiente de transmissão térmica linear.

	BISCO	EN ISO 14683	RCCTE
Ψ [W/m.°C]	0,439	0,15	0,20

O termograma seguinte corresponde ao quarto principal, mas desta feita a análise incide sobre o comportamento do paramento exterior. Tal como na análise anterior, a análise foi efectuada apenas segundo uma das direcções. No entanto, neste caso, as variações de temperatura que se observam na análise numérica são bastante pequenas. Os pontos foram seleccionados de forma a caracterizar a variação de temperatura na zona do pilar, e a zona corrente.

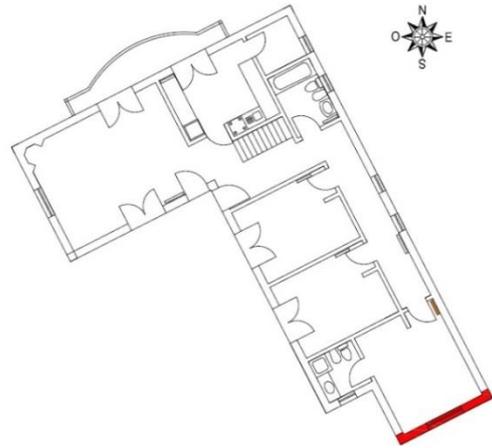


Figura 5.14 - Fotografia da zona exterior do quarto, e respectiva localização no edifício.



Figura 5.15 - Termograma da zona exterior do quarto e respectivos pontos de análise.

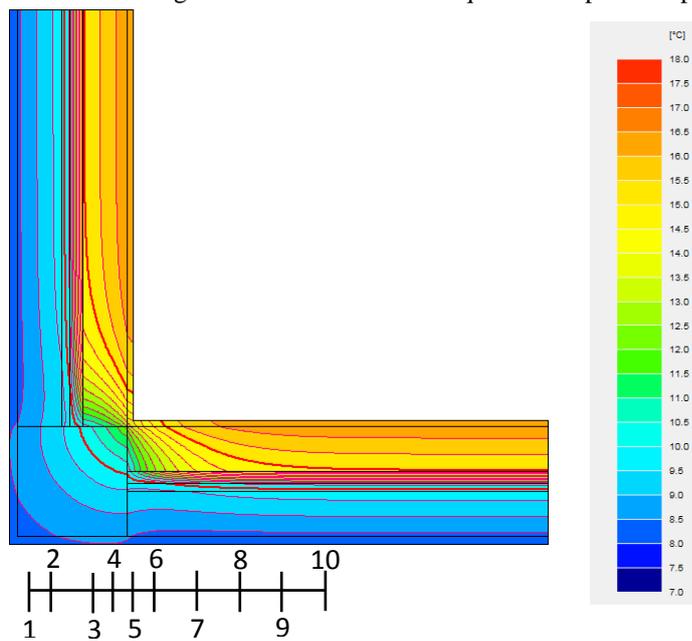


Figura 5.16 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.

Quadro 5.6 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Termografia (°C)	8,8	9,4	9,8	9,6	9,1	8,3	7,3	7,5	7,4	7,6
BISCO (°C)	8,3	8,4	8,5	8,5	8,4	8,3	8,2	8,2	8,3	8,3
Diferença (°C)	0,5	1	1,3	1,1	0,7	0	-0,9	-0,7	-0,9	-0,7

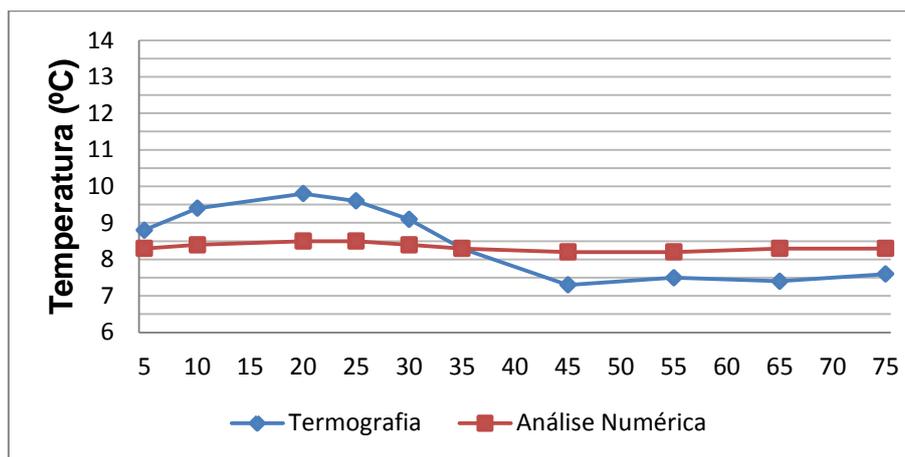


Figura 5.17 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.

Neste caso a envolvente apresenta um comportamento distinto entre os dois métodos, com os valores obtidos através da termografia a apresentarem uma variação que não se verificou na análise através da análise numérica. Nos pontos correspondentes à zona do pilar é possível observar um efeito de ponte térmica bastante mais acentuado nos resultados da análise termográfica.

A segunda zona do edifício analisada foi a zona da sala de estar. A solução construtiva é semelhante à encontrado na zona do quarto, e o termograma corresponde à zona de ligação entre duas fachadas. Tal como na zona do quarto, foi tida em conta a simetria da solução construtiva, e a análise efectuou-se segundo uma das direcções.

O coeficiente de transmissão térmica linear calculado é semelhante ao da zona do quarto, uma vez que se trata da mesma solução construtiva.

Quadro 5.7 – Valores do coeficiente de transmissão térmica linear.

	BISCO	EN ISO 14683	RCCTE
Ψ [W/m.°C]	0,439	0,15	0,20



Figura 5.18 - Fotografia da zona interior da sala de estar, e respectiva localização no edifício.

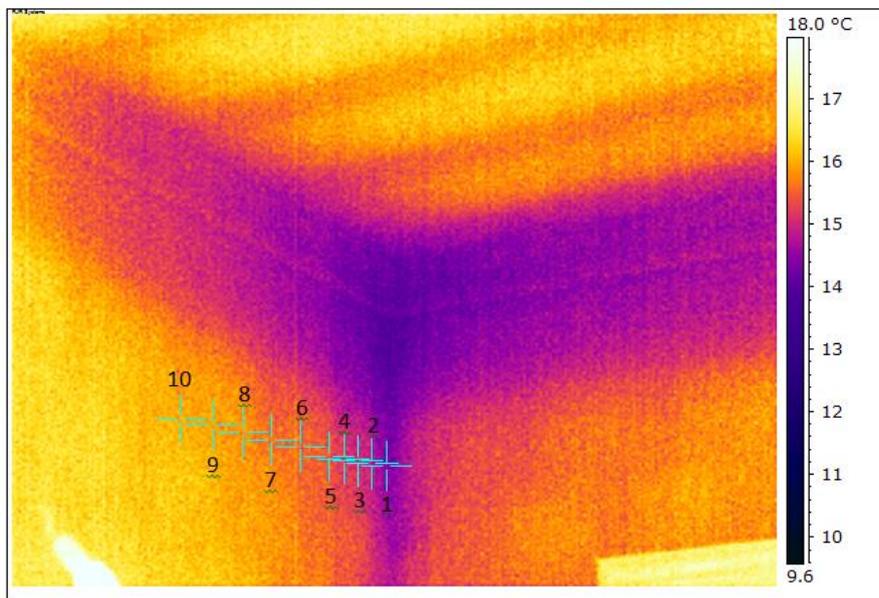


Figura 5.19 - termograma da zona interior da sala de estar e respectivos pontos de análise.

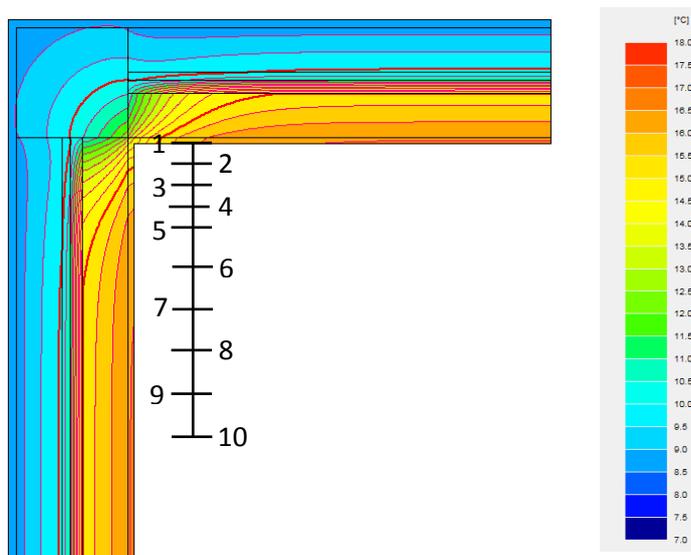


Figura 5.20 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.

Quadro 5.8 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Termografia (°C)	14,5	14,8	15,0	15,1	15,3	15,7	15,6	15,7	15,9	16,1
BISCO (°C)	13,7	14,8	15,5	15,7	16,1	16,3	16,4	16,4	16,5	16,5
Diferença (°C)	0,8	0	-0,5	-0,6	-0,8	-0,6	-0,8	-0,7	-0,6	-0,4

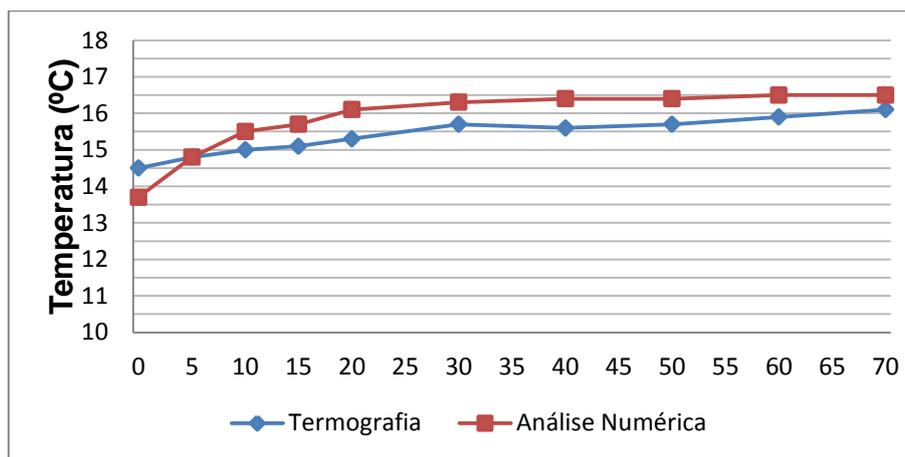


Figura 5.21 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.

À semelhança do que se havia verificado na zona do quarto de dormir, obteve-se um comportamento semelhante através dos dois métodos, sendo que os valores obtidos através da análise numérica foram em média superiores cerca de 0,6°C.

O termograma seguinte ilustra o comportamento térmico do paramento exterior da sala de estar. Tal como se havia verificado na análise da zona do quarto, a distribuição de temperaturas no paramento exterior apresenta uma variação baixa.

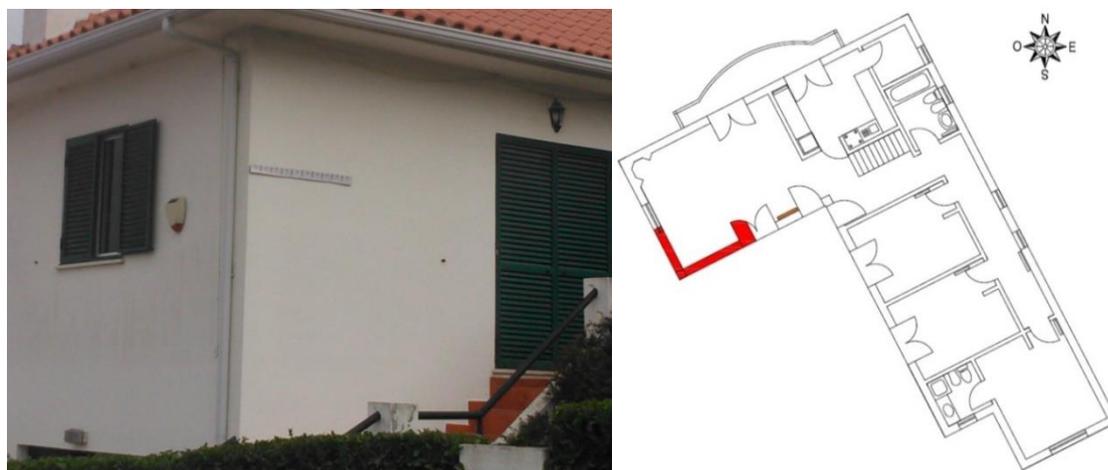


Figura 5.22 - Fotografia da zona exterior da sala de estar, e respectiva localização no edifício.



Figura 5.23 - termograma da zona exterior da sala de estar e respectivos pontos de análise

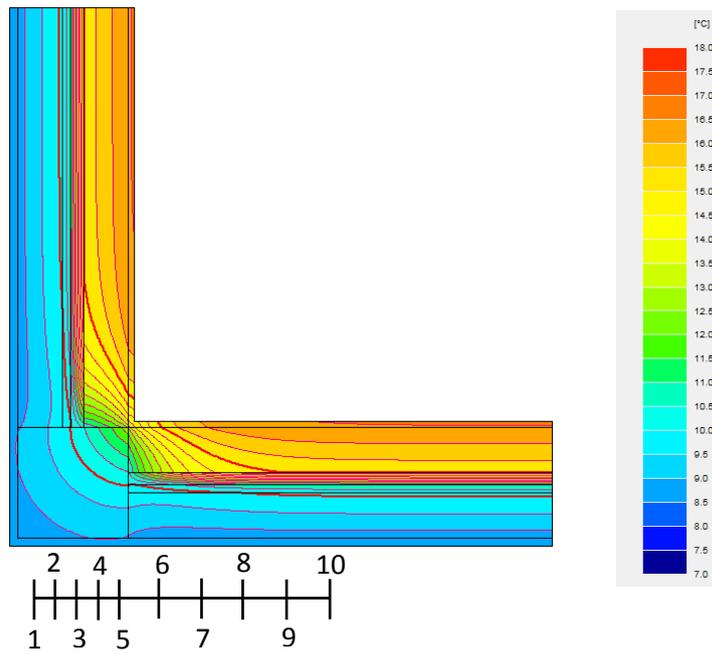


Figura 5.24 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.

Quadro 5.9 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Termografia (°C)	9,3	9,8	9,8	10,0	9,8	9,0	9,2	9,2	9,1	9,3
BISCO (°C)	8,4	8,4	8,5	8,6	8,6	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Diferença (°C)	0,9	1,4	1,3	1,4	1,2	0,5	0,7	0,7	0,6	0,8

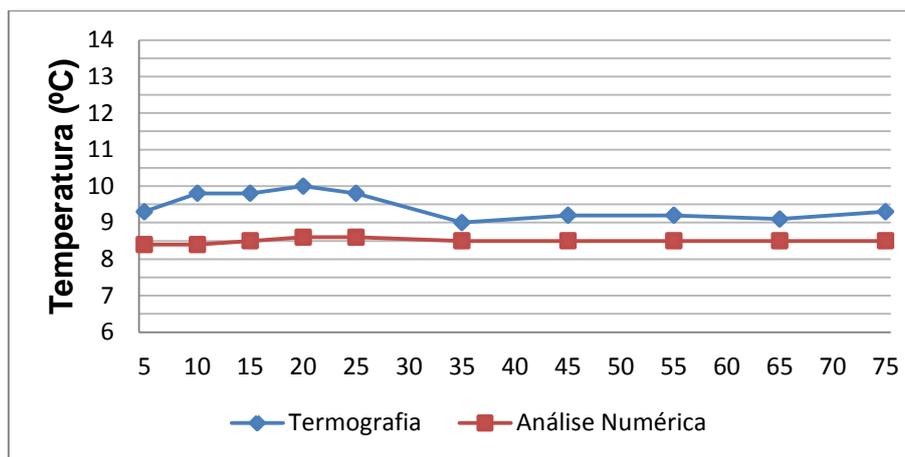


Figura 5.25 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.

A envolvente apresenta um comportamento distinto entre os dois métodos, com os valores obtidos através da termografia a revelarem um efeito de ponte térmica bem mais pronunciado.

Na sala de estar, foi efectuada ainda uma análise à zona de ligação entre a laje do piso intermédio e as paredes que constituem a fachada. Esta zona é caracterizada por uma laje aligeirada de vigotas e abobadilhas cerâmicas, e com revestimento de piso em ladrilhos cerâmicos. Foi analisada a distribuição de temperaturas no paramento exterior, em particular a variação de temperatura provocada pela heterogeneidade dos materiais na zona de ponte térmica.

O coeficiente de transmissão térmica linear calculado encontra-se entre o valor da norma e o do RCCTE, no entanto estes apresentam uma grande disparidade entre eles para o valor de referência.

Quadro 5.10 - Valores do coeficiente de transmissão térmica linear.

	BISCO	EN ISO 14683	RCCTE
Ψ [W/m.°C]	0,426	0,25	0,95

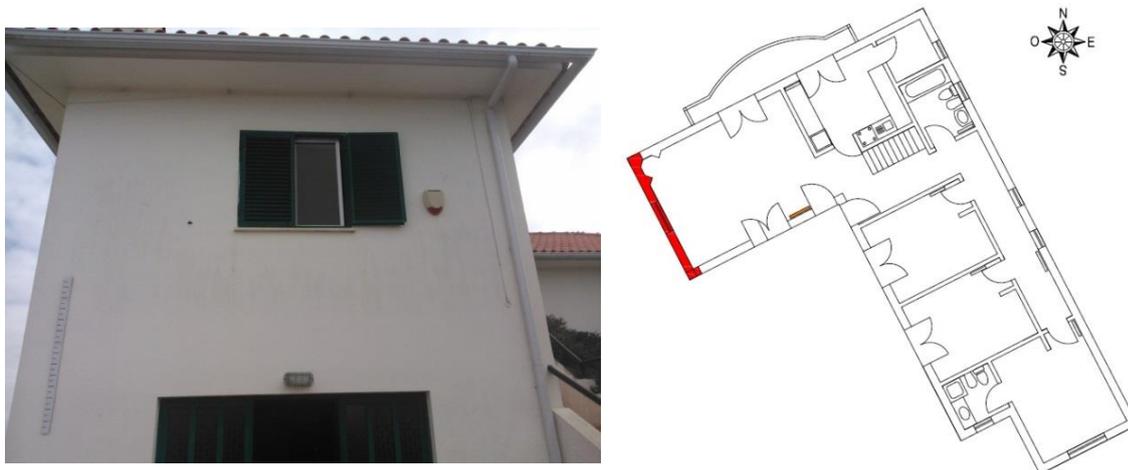


Figura 5.26 - Fotografia da fachada na zona da sala de estar, e respectiva localização no edifício.

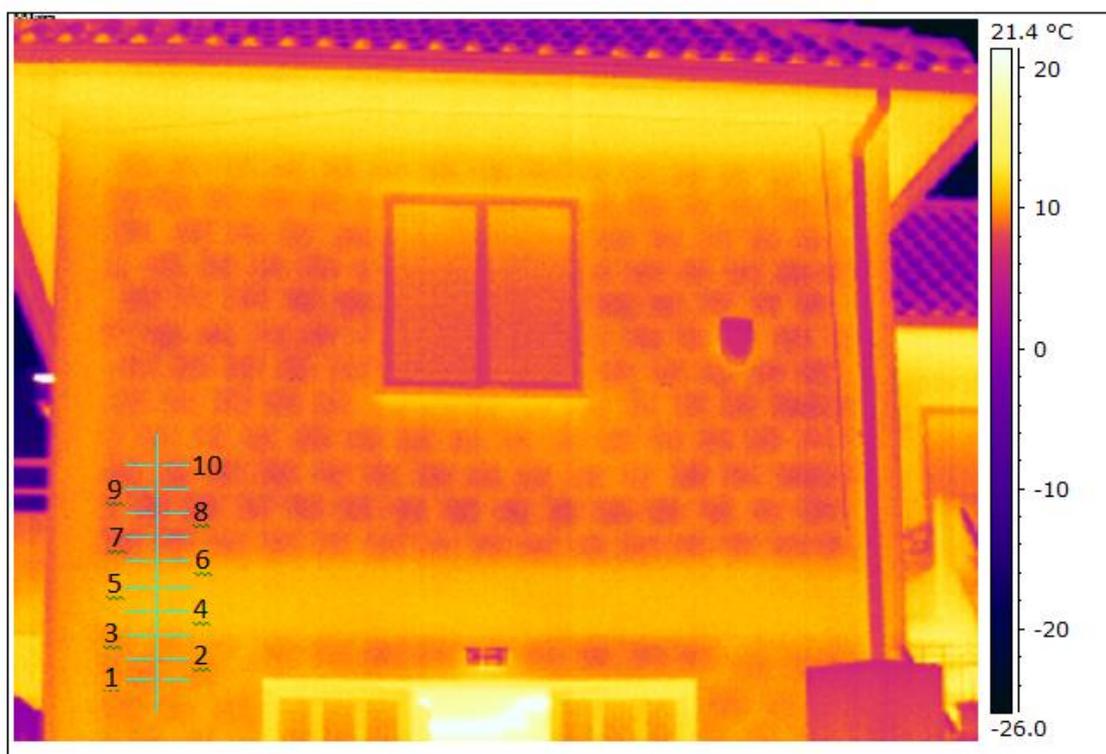


Figura 5.27 - termograma da fachada e respectivos pontos de análise.

Quadro 5.11 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Termografia (°C)	9,3	9,6	10,0	10,7	10,6	9,9	8,6	8,1	8,5	9,0
BISCO (°C)	8,3	8,4	8,7	8,9	9,0	8,8	8,4	8,3	8,4	8,4
Diferença (°C)	1	1,2	1,5	1,8	1,6	1,1	0,2	-0,2	0,1	0,6

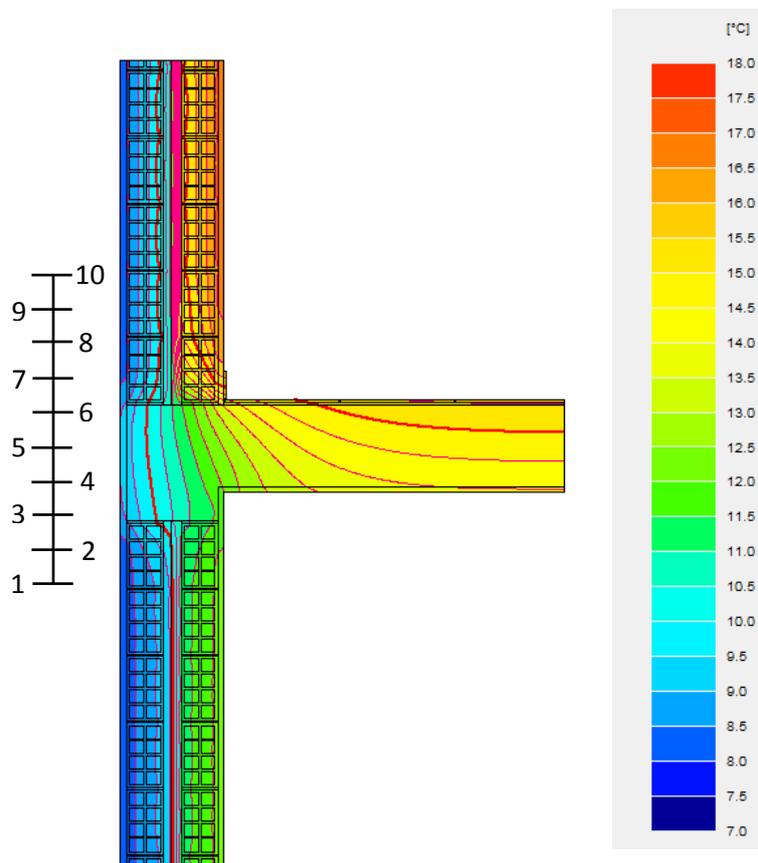


Figura 5.28 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.

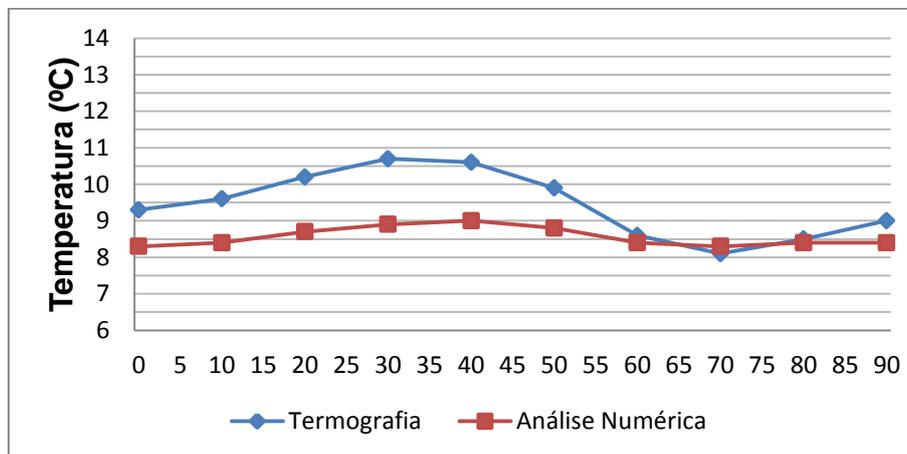


Figura 5.29 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.

Nesta zona verifica-se que o comportamento é semelhante na análise pelos dois processos, mas o ensaio termográfico revela uma variação mais acentuada das temperaturas, indicando um efeito de ponte térmica mais acentuado.

5.6.2. Edifício 2

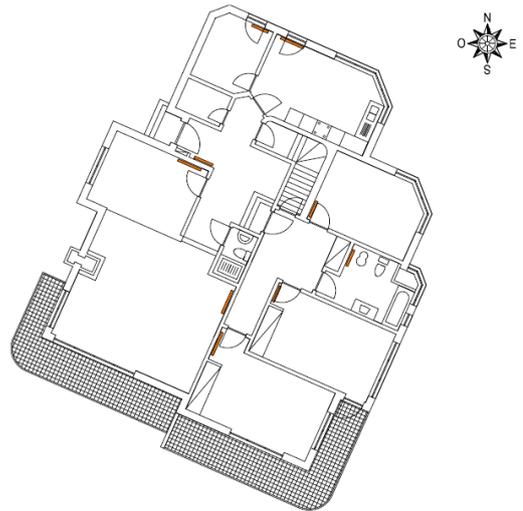


Figura 5.30 – Planta do edifício 2.

O segundo edifício analisado trata-se de um edifício unifamiliar, construído em 1985. À semelhança do primeiro edifício, este é constituído por paredes exteriores duplas com caixa e paredes interiores simples rebocadas. O edifício não possui qualquer tipo de camada de isolamento térmico na constituição das suas paredes.

O primeiro termograma analisado neste edifício, pertence à zona da sala de estar, e mostra a zona de ligação entre duas paredes. À semelhança do que se realizou para o primeiro edifício, a análise foi realizada segunda uma das direcções, sendo que os pontos definidos estão mais concentrados na zona de ligação, onde ocorrem as maiores variações de temperatura.

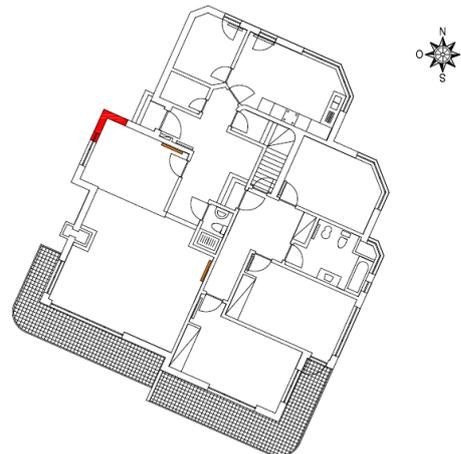
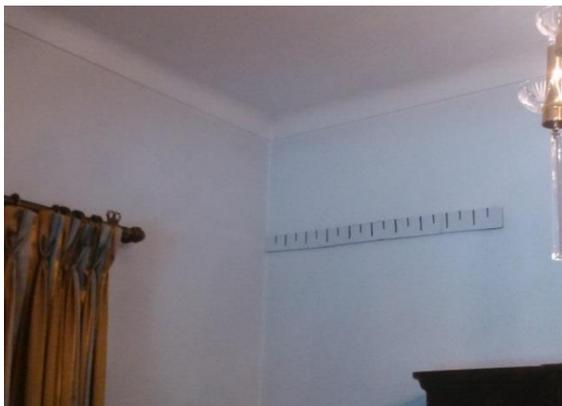


Figura 5.31 - Fotografia da zona interior da sala de estar, e respectiva localização no edifício.

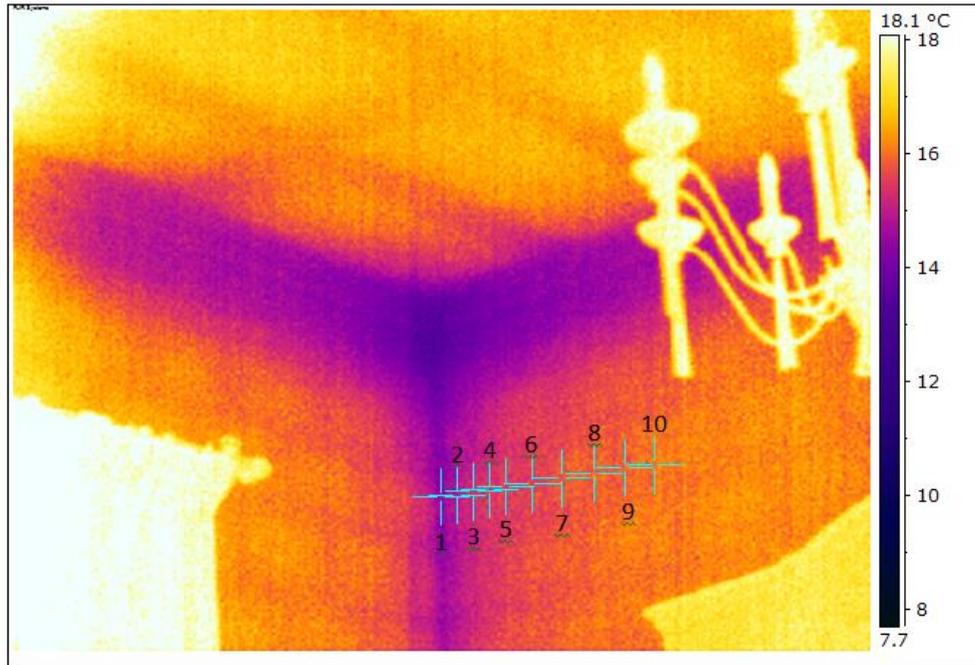


Figura 5.32 - termograma da zona interior da sala de estar e respectivos pontos de análise.

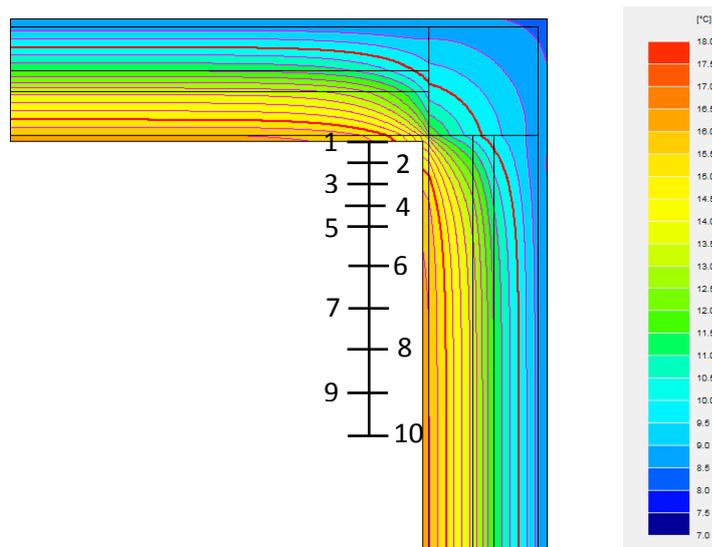


Figura 5.33 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.

Quadro 5.12 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Termografia (°C)	14,6	14,9	15,5	15,5	15,4	15,5	15,7	16,0	16,0	16,0
BISCO (°C)	13,5	14,7	15,3	15,6	15,7	15,9	16,1	16,1	16,2	16,2
Diferença (°C)	1,1	0,2	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,4	-0,1	-0,2	-0,2

Quadro 5.13 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.

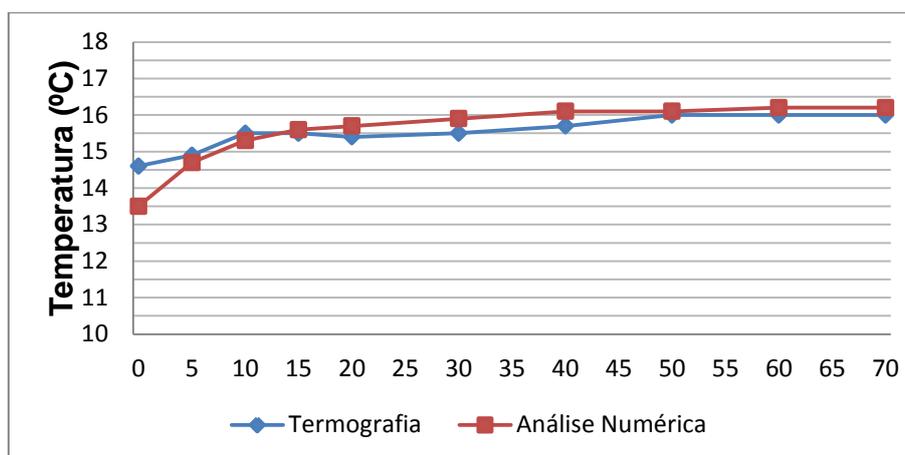


Figura 5.34 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.

Neste primeiro termograma do edifício 2, verificou-se novamente um comportamento muito semelhante nos resultados obtidos através dos dois métodos, sendo que neste caso os valores obtidos são muito aproximados, à exceção do ponto que se encontra na zona de ligação (ponto1), no qual se verifica uma diferença de cerca de 1°C.

O coeficiente de transmissão térmica linear calculado é inferior ao calculado para a zona semelhante no edifício 1. Este resultado está de acordo com o esperado, uma vez que o coeficiente de transmissão térmica das paredes é superior, resultando num coeficiente de transmissão térmica linear inferior, tal como demonstrado pela equação 5.5.

Quadro 5.14 – Comparação do coeficiente de transmissão térmica linear para zonas semelhantes.

	Edifício 2	Edifício 1
Ψ [W/m.°C]	0,333	0.439

O termograma seguinte ilustra uma parte da fachada com orientação Norte-Poente. A zona onde se encontram os pontos corresponde pelo exterior, à zona interior da sala estudada acima. À semelhança dos casos estudados anteriormente, procedeu-se a um refinamento das linhas isotérmicas para determinar as temperaturas provenientes da análise numérica.

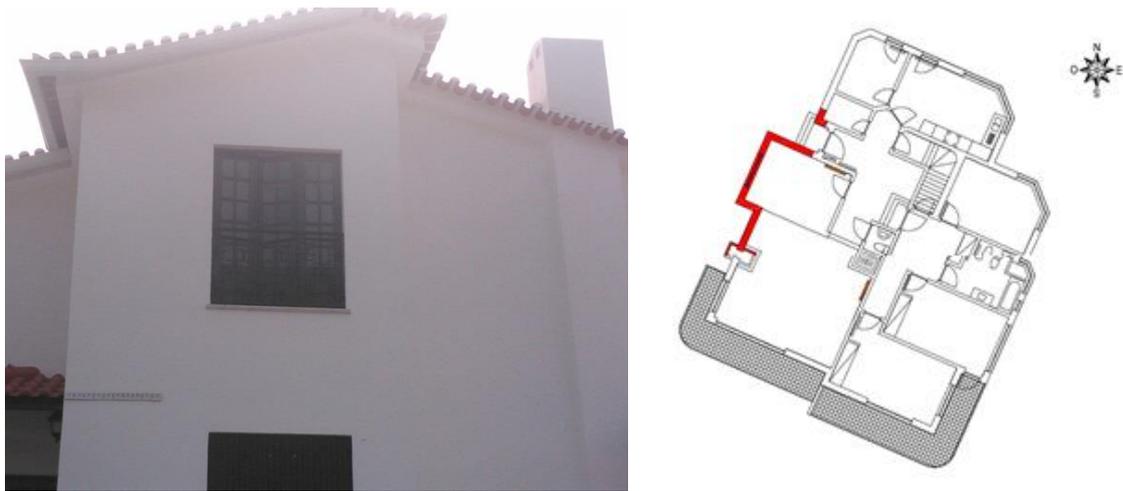


Figura 5.35 - Fotografia da zona exterior da sala de estar, e respectiva localização no edifício.

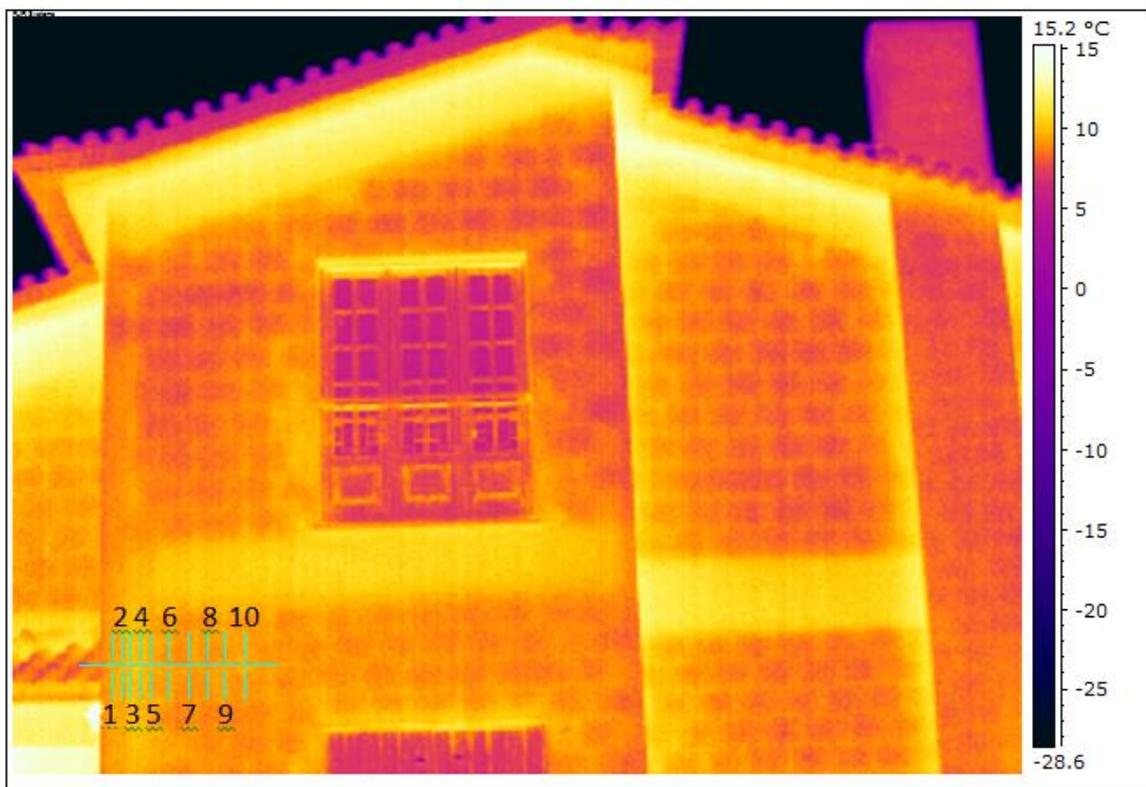


Figura 5.36 - Termograma da zona da sala pelo exterior e respectivos pontos de análise.

Quadro 5.15 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Termografia (°C)	9,3	9,4	9,8	10,0	9,7	9,2	9,0	9,0	9,2	9,4
BISCO (°C)	8,4	8,5	8,5	8,7	8,6	8,5	8,6	8,7	8,7	8,7
Diferença (°C)	0,9	0,9	1,3	1,3	1,1	0,7	0,4	0,3	0,5	0,7

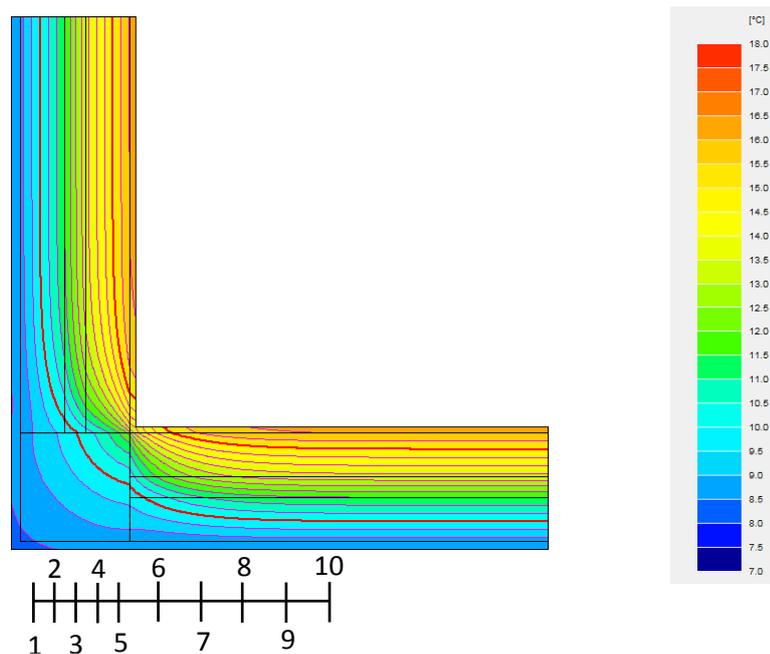


Figura 5.37 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.

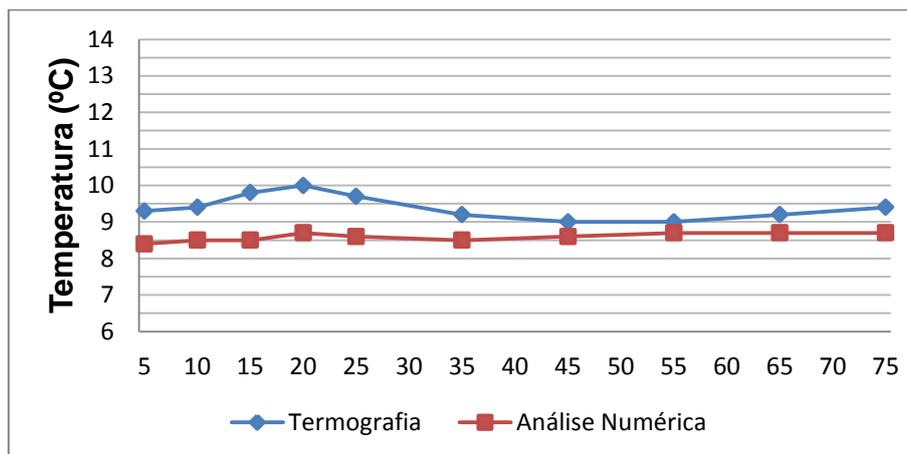


Figura 5.38 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.

As temperaturas registadas através do ensaio termográfico foram sempre superiores. Apesar de em termos de comportamento os dois métodos apresentarem resultados semelhantes, a análise termográfica revela um efeito de ponte térmica mais pronunciado.

O termograma da fachada Norte-Poente da Figura 6.46, ilustra bem o comportamento térmico da envolvente exterior deste edifício. Para a análise dos valores das temperaturas na fachada exterior, foi modelada a zona de ligação entre a laje de piso intermédio e as paredes que constituem a fachada.

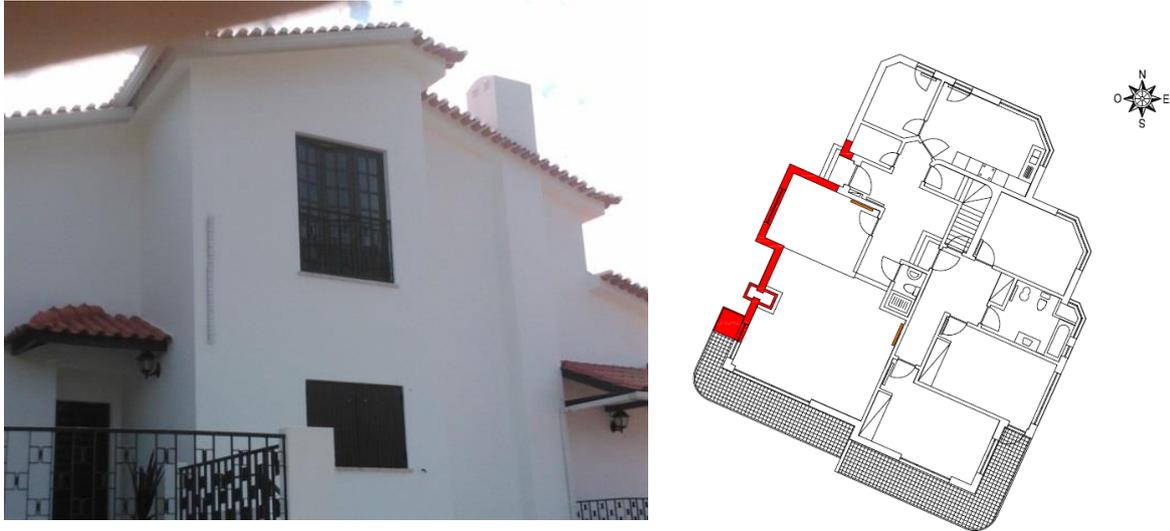


Figura 5.39 - Fotografia da com orientação Norte-Poente, e respectiva localização no edifício.

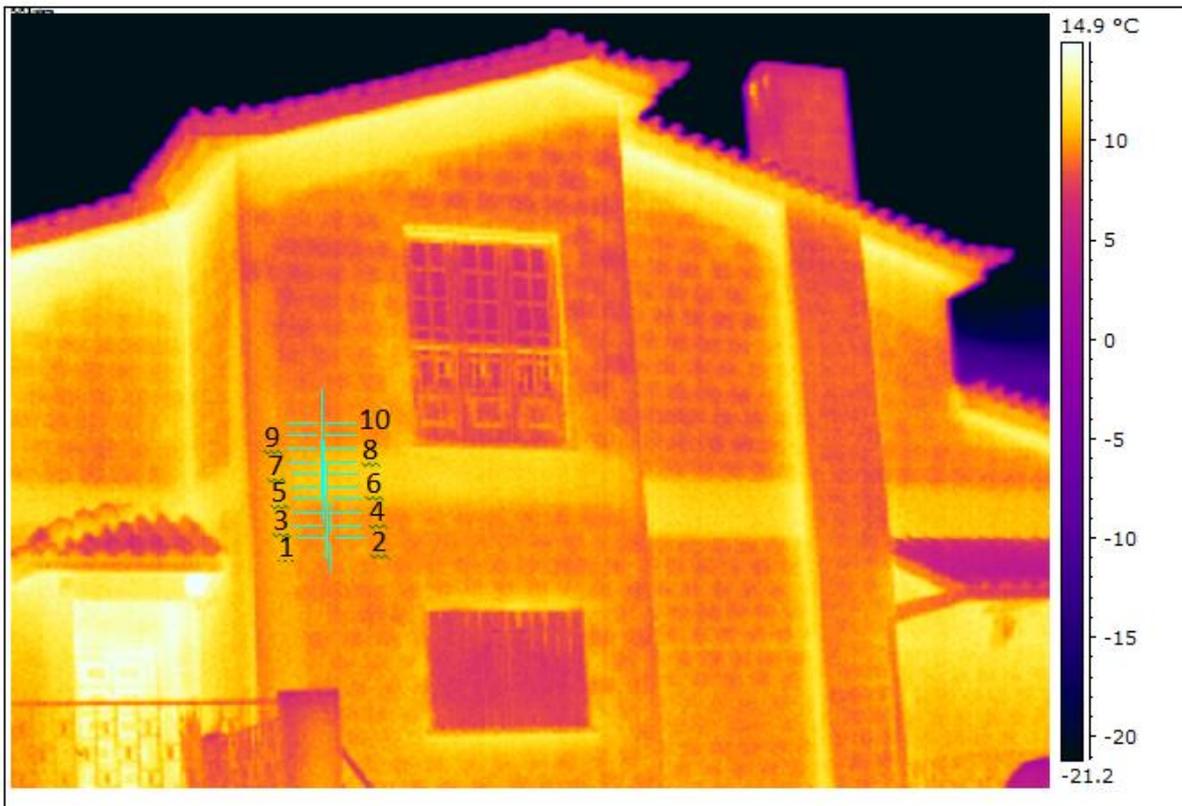


Figura 5.40 - Termograma da fachada com orientação Norte-Poente e respectivos pontos de análise.

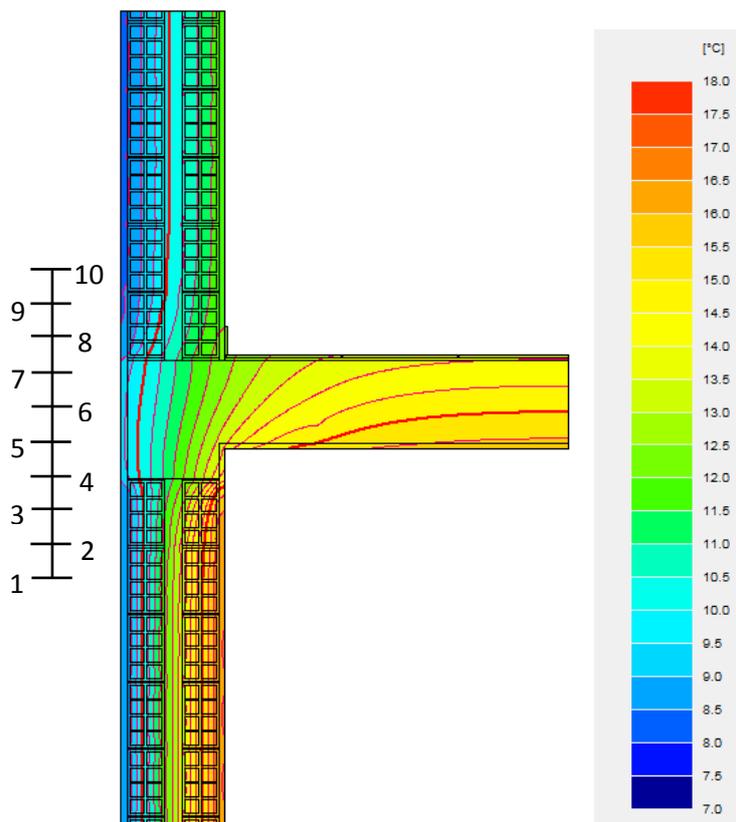


Figura 5.41 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas e respectivas linhas isotérmicas.

Quadro 5.16 - Valores de temperatura obtidos através da termografia infravermelha, e através da análise numérica.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Termografia (°C)	9,6	9,6	9,7	10,5	10,8	10,4	10,6	9,7	9,3	9,3
BISCO (°C)	8,6	8,6	9,0	9,2	9,2	9,1	9,1	8,8	8,4	8,4
Diferença (°C)	1,0	1,0	0,7	1,3	1,6	1,3	1,5	0,9	0,9	0,9

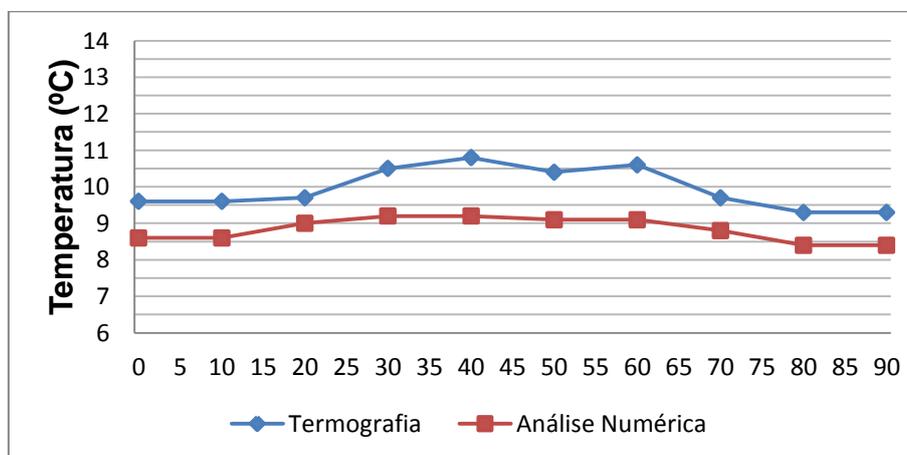


Figura 5.42 - Representação gráfica da distribuição de temperaturas.

No estudo desta zona encontrou-se a maior discrepância entre os valores da análise numérica e os da termografia infravermelha, com os últimos a serem em média cerca de 1°C superiores aos primeiros. Ao nível do comportamento ao longo da envolvente, a variação registada nas diferentes zonas do paramento foi semelhante entre métodos, com o efeito de ponte térmica a ser mais acentuado na análise termográfica.

O coeficiente de transmissão térmica linear calculado é inferior ao calculado para a zona semelhante no edifício 1. Este resultado está de acordo com o esperado, uma vez que o coeficiente de transmissão térmica das paredes é superior, resultando num coeficiente de transmissão térmica linear inferior, tal como demonstrado pela equação 5.5.

Quadro 5.17 – Comparação do coeficiente de transmissão térmica linear para zonas semelhantes.

	Edifício 2	Edifício 1
Ψ [W/m.°C]	0,318	0.426

5.6.3. Análise dos resultados

Através da análise dos resultados obtidos, é possível estabelecer uma comparação entre os dois métodos e os resultados produzidos por cada um deles. Para cada tipo de zona analisada, foi estabelecida uma comparação entre as diferenças de temperatura obtidas, com o objectivo de identificar padrões, e eventuais erros de medição que possam ter ocorrido.

Zona de ligação entre paramentos pelo interior

Na Figura 5.43 está representada a comparação entre as diferenças de temperatura obtidas. Os valores dizem respeito à análise das zonas interiores, no quarto e sala do edifício 1, e na sala do do edifício 2.

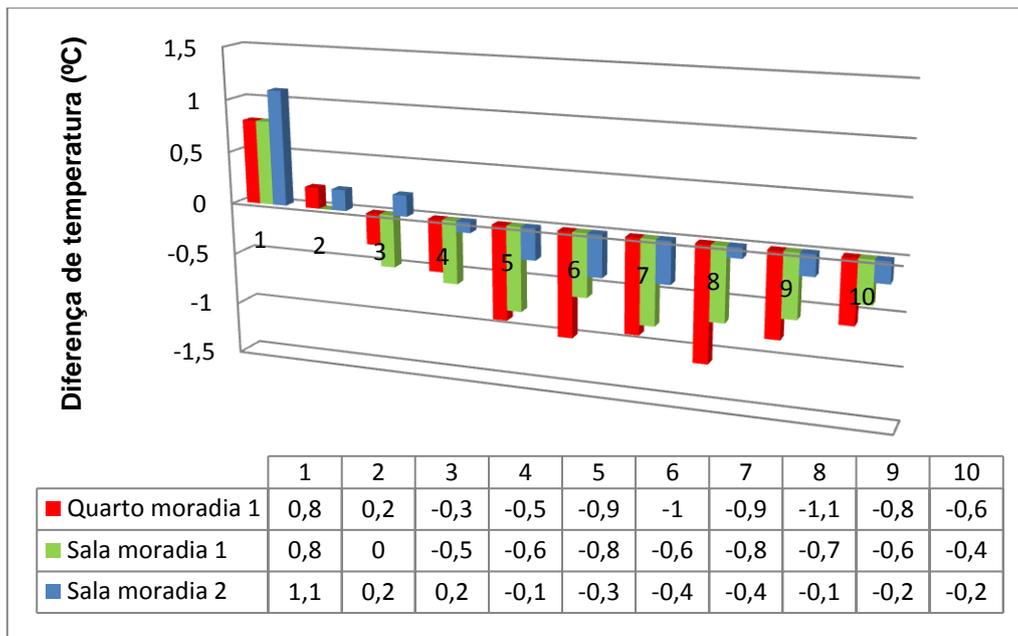


Figura 5.43 - Representação gráfica da comparação entre diferenças de temperatura nas zonas interiores.

Da análise da desta zona retiraram-se as seguintes conclusões:

- A temperatura obtida através da análise termográfica no ponto 1 (Zona de ligação entre paramentos) foi sempre superior à obtida através da análise numérica no mesmo ponto.
- As diferenças de temperatura nas duas divisões do edifício 1 são muito semelhantes, como seria de esperar uma vez que se trata da mesma solução construtiva e de condições de temperatura bastante semelhantes.
- No edifício 1, nos dois pontos mais próximos da zona de ligação entre paramentos, as temperaturas obtidas através da termografia são superiores. Nos restantes pontos as temperaturas registadas através da análise numérica são superiores, o que indica que na realidade se verifica uma maior perda de calor através da envolvente.
- A diferença de temperaturas na zona interior do edifício 2 segue uma trajectória semelhante às do edifício 1, no entanto, a diferença registada entre métodos é significativamente inferior às registadas no edifício 1.
- Nas divisões do edifício 1, as diferenças de temperatura registadas são superiores às registadas no edifício 2, que não possui isolamento térmico nas paredes. Isto poderá indicar que o isolamento térmico no edifício 1, não tem o desempenho que deveria.

Zona de ligação entre paramentos pelo exterior

Na figura 5.44 está representada a comparação entre as diferenças de temperatura obtidas. Desta feita a análise recai sobre o comportamento das zonas exteriores, no quarto e sala do edifício 1, e na sala do edifício 2.

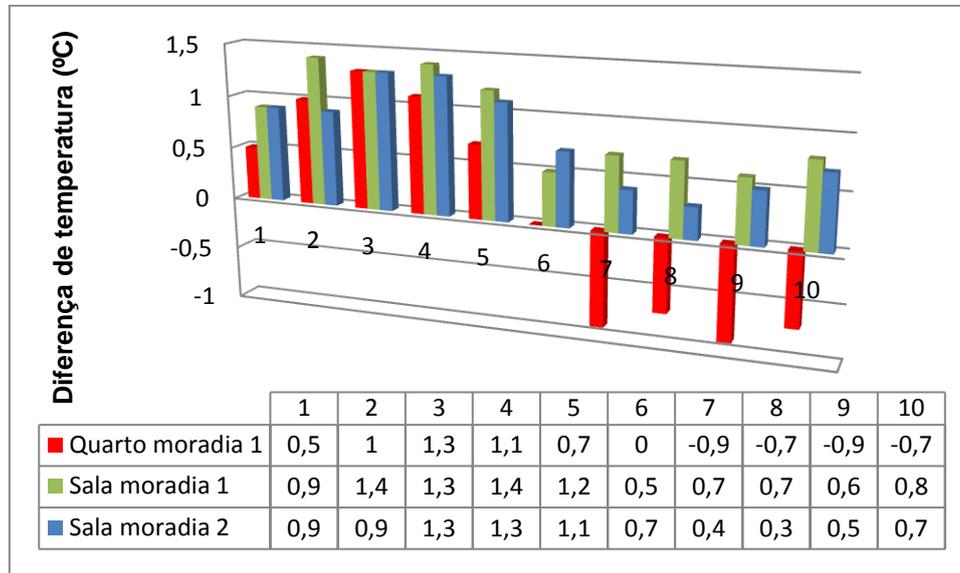


Figura 5.44 - Representação gráfica da comparação entre diferenças de temperatura nas zonas exteriores.

Da análise desta zona, retiraram-se as seguintes conclusões:

- Ao contrário do que se verificou na análise pelo interior, as diferenças de temperatura nas duas divisões do edifício 1 diferem bastante uma da outra. Na zona da sala de estar, as temperaturas obtidas por termografia são sempre superiores às obtidas através da análise numérica. Na zona do quarto as temperaturas obtidas por termografia são superiores na zona da ponte térmica e inferiores na zona corrente.
- As variações de temperatura na sala de estar do edifício 1, e na sala de estar do edifício 2, apresentam um comportamento semelhante, o que pode indicar a existência de uma anomalia que afecta o comportamento térmico na zona corrente do paramento exterior da zona do quarto. Esta variação também se pode dever a um eventual erro de medição.
- O facto do edifício 2 não possuir isolamento térmico não se traduz num decréscimo significativo nas diferenças de temperatura relativamente ao edifício 1, como se verificava na análise pelo interior.
- As diferenças de temperatura que se verificaram na análise pelo exterior, são de modo geral superiores às verificadas pelo interior.
- Nas zonas de pilar o efeito de ponte térmica é na realidade bem mais acentuado do que o sugerido pela análise numérica.

Zona de ligação entre a laje de piso intermédio e a fachada

Na figura 5.45 está representada a comparação entre as diferenças de temperatura obtidas na zona de ligação entre o piso intermédio e a fachada.

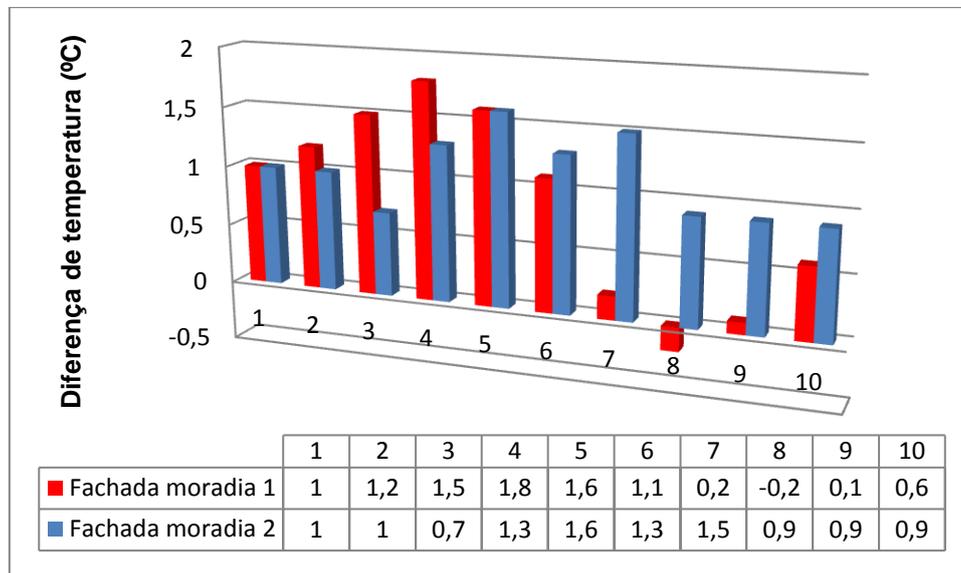


Figura 5.45 - Representação gráfica da comparação entre diferenças de temperatura na zona de ligação entre o piso intermédio e a fachada.

Da análise das diferenças de temperatura, retiraram-se as seguintes conclusões:

- Na zona do pilar foram registadas as maiores diferenças de temperatura, pontos 3, 4 e 5 no edifício 1, e pontos 4, 5, 6 e 7 no edifício 2, indicando efeitos de ponte térmica mais acentuados do que os indicados pela análise numérica.
- No edifício 1 verificam-se maiores diferenças de temperatura na zona corrente do piso não aquecido. No caso do edifício 2 esta diferença não se verifica.
- De forma geral as diferenças de temperatura registadas na análise desta zona dos edifícios foram superiores às registadas nas outras zonas.

6. PROPOSTA DE MELHORIA

Neste capítulo, apresentam-se propostas para a melhoria do desempenho térmico dos edifícios analisados. A opção recaiu sobre a aplicação de um Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS) para reforço do isolamento térmico. A solução escolhida foi modelada, e analisada recorrendo ao programa BISCO, e os resultados foram comparados aos obtidos para a solução construtiva actual. No anexo V encontra-se uma descrição detalhada do sistema ETICS, assim como os materiais constituintes, método de aplicação e principais vantagens deste tipo de sistema.

6.1. Modelação do sistema

A aplicação de um sistema de reforço do isolamento térmico resultaria numa melhoria significativa do desempenho térmico. Para a simulação dessas mesmas melhorias, foi modelada através do programa BISCO, a aplicação do sistema sobre as soluções construtivas existentes. Foram modeladas três soluções distintas, com placas de EPS com 30, 50, e 80 mm de espessura. Para efeitos de simplificação, estes sistemas serão referidos por EPS30, EPS50 e EPS80 respectivamente.

6.2. Constituição do sistema ETICS

As diferentes marcas presentes no mercado nacional oferecem de modo geral o mesmo modelo de produto, apresentando algumas variações entre elas. O sistema mais utilizado consiste na aplicação de um reboco delgado armado sobre poliestireno expandido, tal como ilustrado nas figuras 6.1 e 6.2.

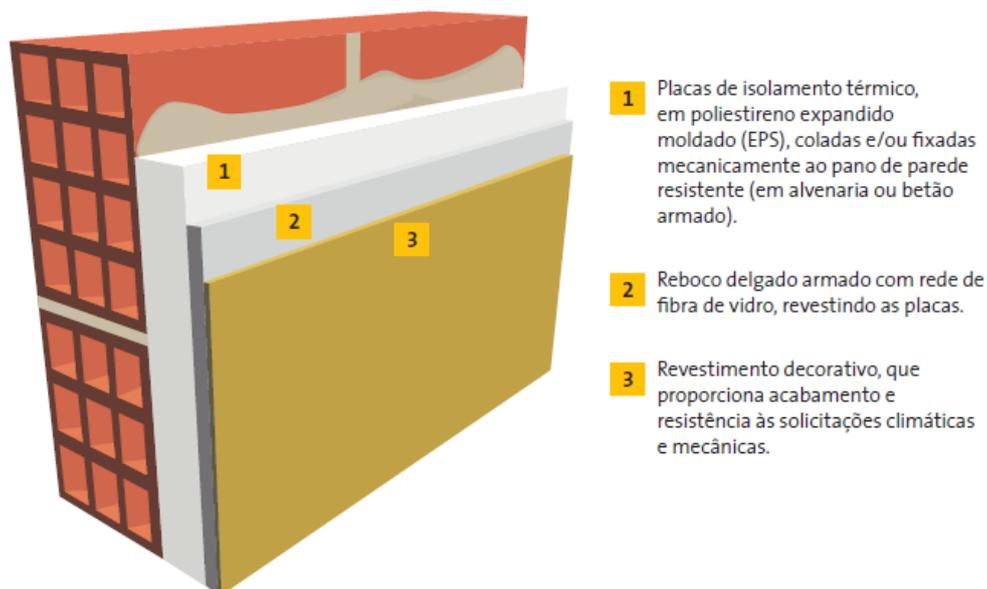


Figura 6.1 - Constituição do sistema de ETICS [18].

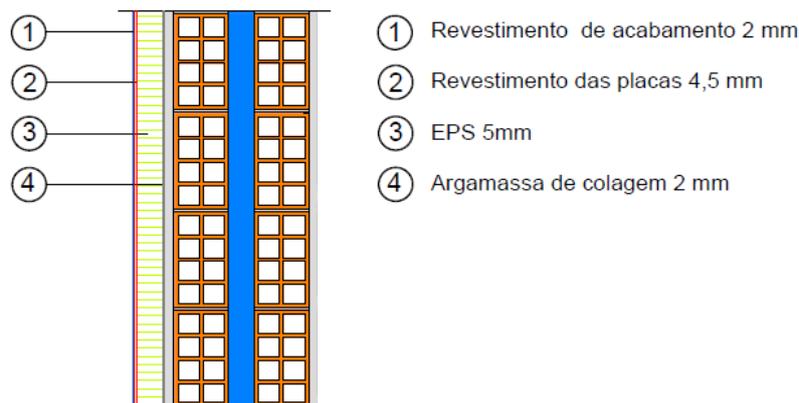


Figura 6.2 - Exemplo do sistema ETICS Adoptado. Sistema com placas de EPS com 5 cm.

Como referido anteriormente, a modelação foi efectuada para três espessuras diferentes de poliestireno expandido. Desta forma é possível estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos para cada uma delas, e identificar se o aumento da espessura da camada de isolamento do sistema ETICS, se traduz numa melhoria significativa da distribuição de temperaturas. As temperaturas para o ambiente interior, e exterior definidas, foram as que se verificaram no decorrer do ensaio termográfico.

6.2.1. Edifício 1

Zona do quarto de dormir

Relativamente à distribuição de temperaturas, a introdução do sistema ETICS, resulta num aumento significativo das temperaturas. A aplicação do sistema EPS30 resulta num aumento de cerca de 3°C na temperatura média do paramento exterior. No paramento interior regista-se um aumento da temperatura na zona corrente. A adopção de um sistema com uma maior espessura de isolamento térmico resulta, sobretudo, na uniformização das temperaturas nos paramentos exterior e interior. A solução EPS80 apresenta resultados que indicam uma diferença média de apenas 3°C entre a superfície dos paramentos interior e exterior (16-17°C no paramento interior, e 13-14°C no paramento exterior), sendo que a solução existente apresenta uma diferença na ordem dos 8°C.

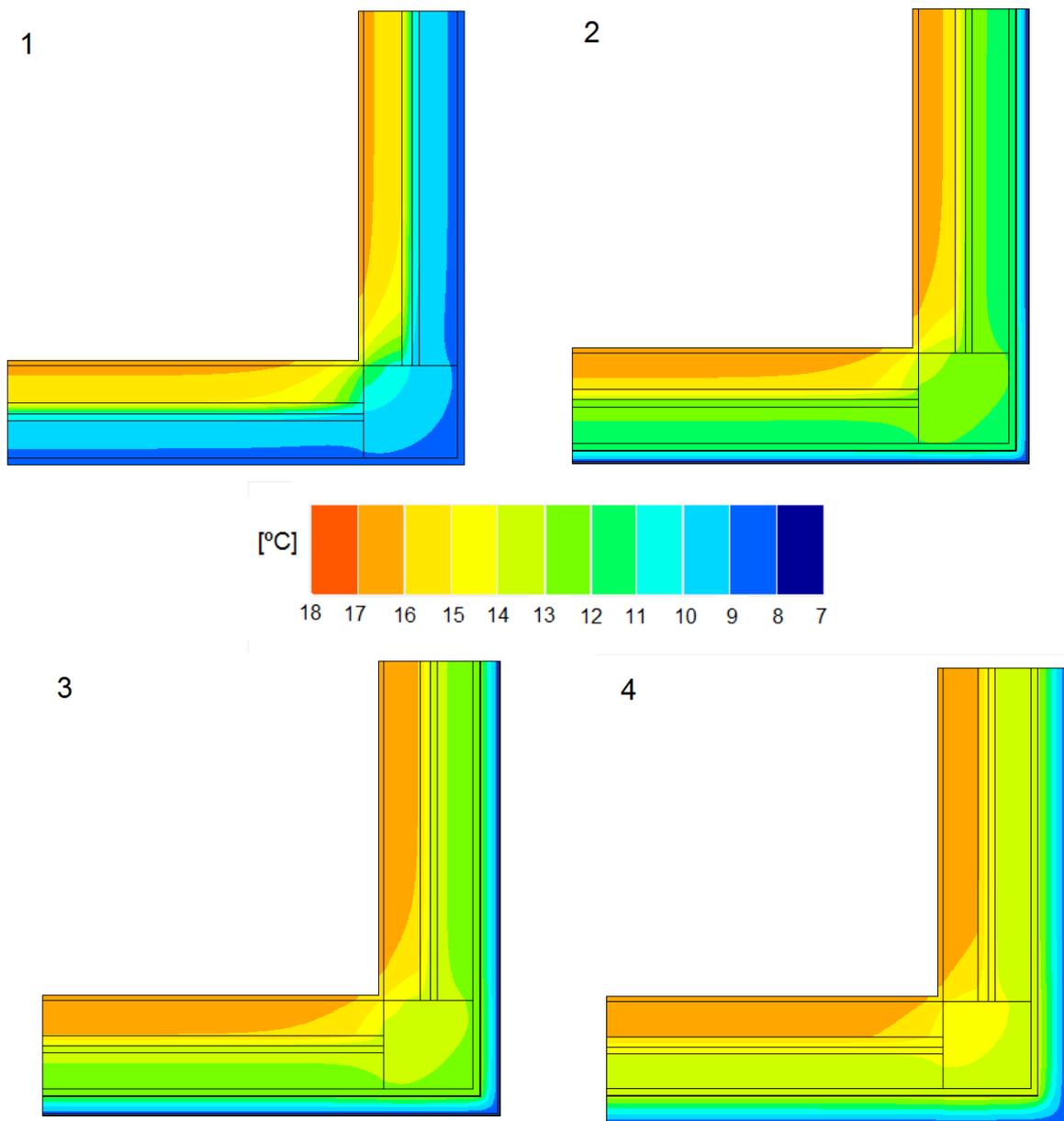


Figura 6.3 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2) ETICS com 3 cm de EPS, (3) ETICS com 5 cm de EPS, (4) ETICS com 8 cm de EPS.

Zona da sala de estar

A distribuição de temperaturas também vai apresentar tendências semelhantes, uma vez que se trata do mesmo pormenor construtivo, e a diferença entre as temperaturas registadas em ambas as divisões é demasiado pequena para que os resultados produzidos apresentem grandes diferenças dos obtidos para a zona do quarto de dormir.

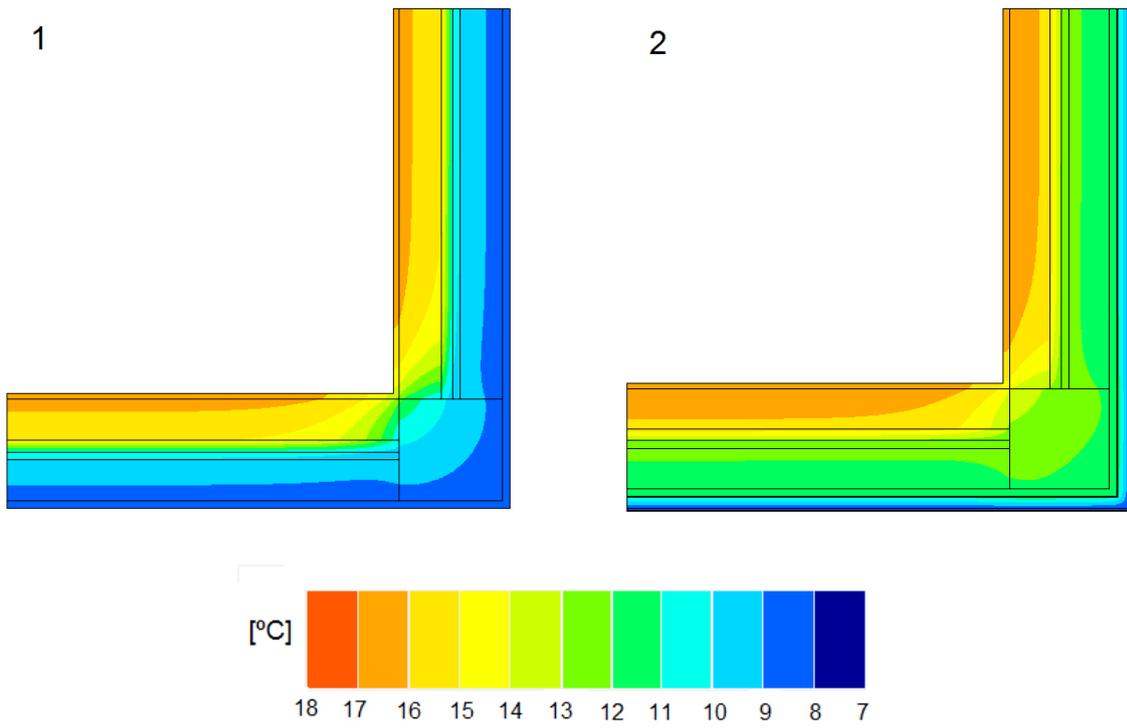


Figura 6.4 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2)

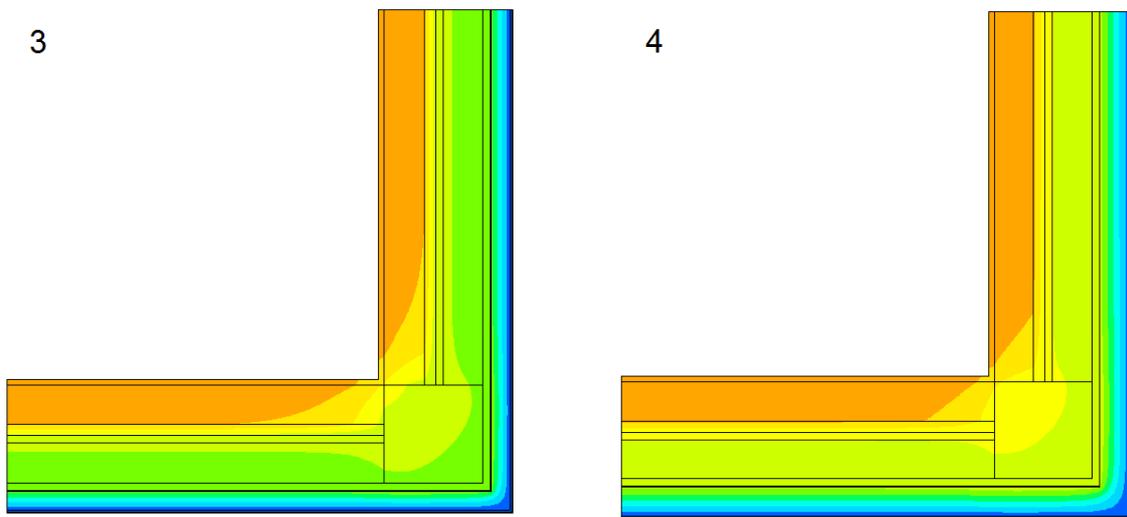


Figura 6.5 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (3) ETICS com 5 cm de EPS, (4) ETICS com 8 cm de EPS.

Zona de ligação entre o piso intermédio e a fachada

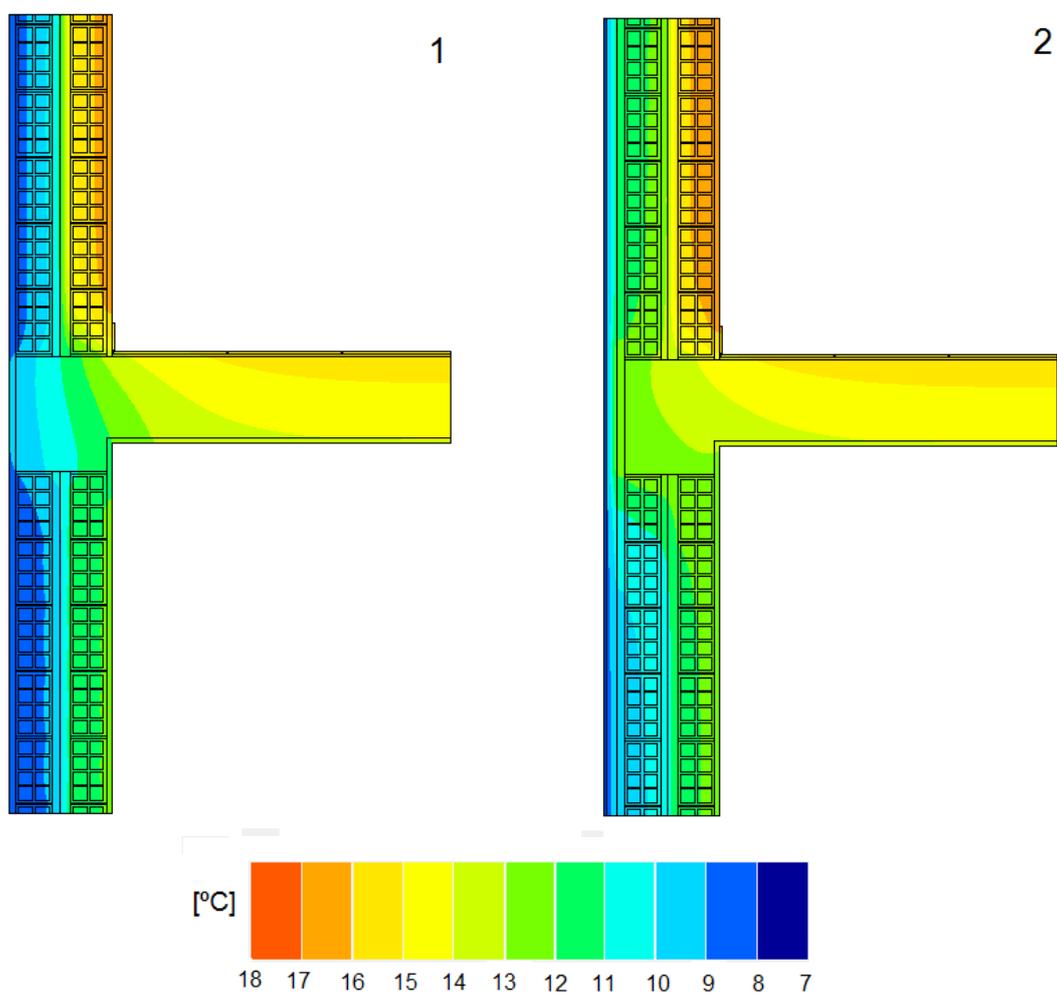


Figura 6.6 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2) ETICS com 3 cm de EPS.

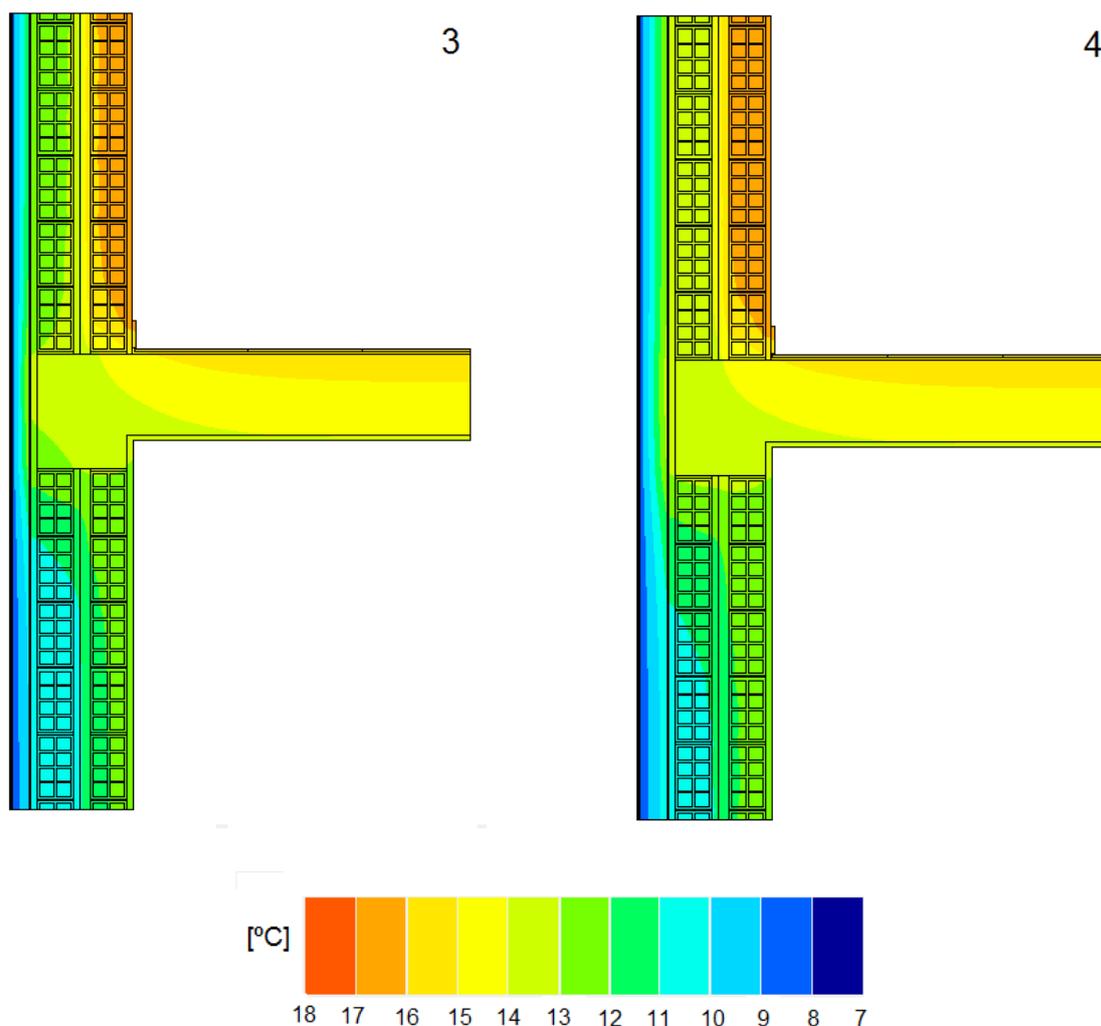


Figura 6.7 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (3) ETICS com 5 cm de EPS, (4) ETICS com 8 cm de EPS.

Com a introdução do sistema ETICS, passa a existir uma camada de isolamento na zona da ponte térmica, o que irá resultar numa melhoria geral do comportamento térmico. A adopção do sistema EPS30 revela aumentos de cerca de 3°C no paramento exterior do piso aquecido e de cerca de 1°C no piso não aquecido. No paramento interior as temperaturas aumentam também, embora de maneira menos significativa. Tal como se havia verificado para o pormenor construtivo da zona da sala de estar, a utilização de placas de isolamento com uma maior espessura, resulta na uniformização das temperaturas nos paramentos interior e exterior.

6.2.2. Edifício 2

Zona da sala de estar

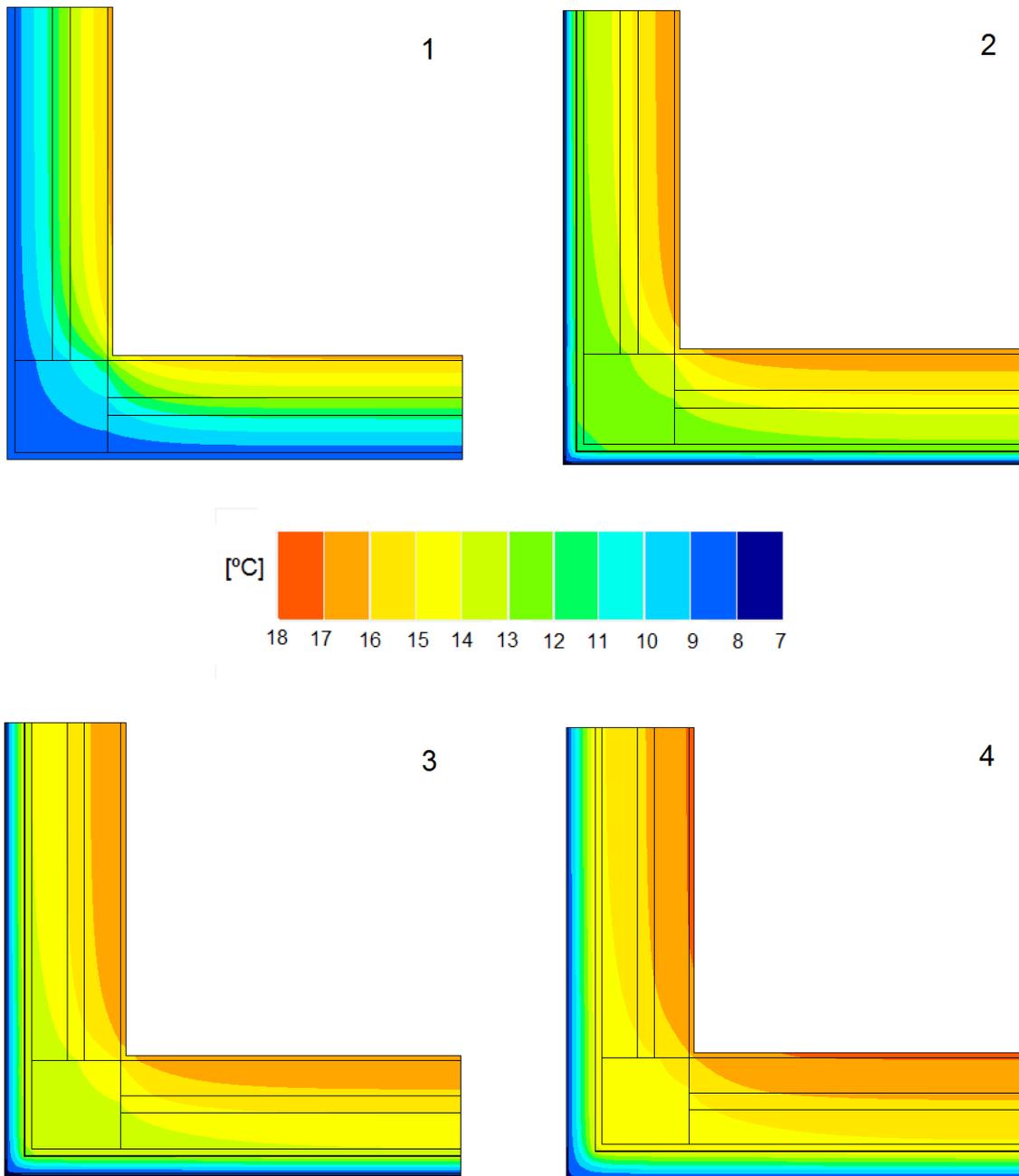


Figura 6.8 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2) ETICS com 3 cm de EPS, (3) ETICS com 5 cm de EPS, (4) ETICS com 8 cm de EPS.

No edifício 2, a aplicação do sistema EPS30 resulta num aumento substancial das temperaturas ao longo de todo o pormenor. Uma vez que este edifício não possui qualquer camada de isolamento térmico, os resultados obtidos são ainda mais significativos do que os que verificados no edifício 1. No paramento exterior registaram-se aumentos da temperatura média

na ordem dos 4°C. No paramento interior verificou-se uma diminuição na variação das temperaturas ao longo da zona corrente, com um aumento de cerca de 2°C em determinadas zonas do paramento. A adopção de sistemas com maior espessura de isolamento térmico (EPS50 e EPS80) resulta na uniformização das temperaturas, sendo que a solução EPS80 regista temperaturas praticamente uniformes nos paramentos interior (entre os 16 e os 17°C) e exterior (entre os 14 e os 15°C).

Zona de ligação entre o piso intermédio e a fachada

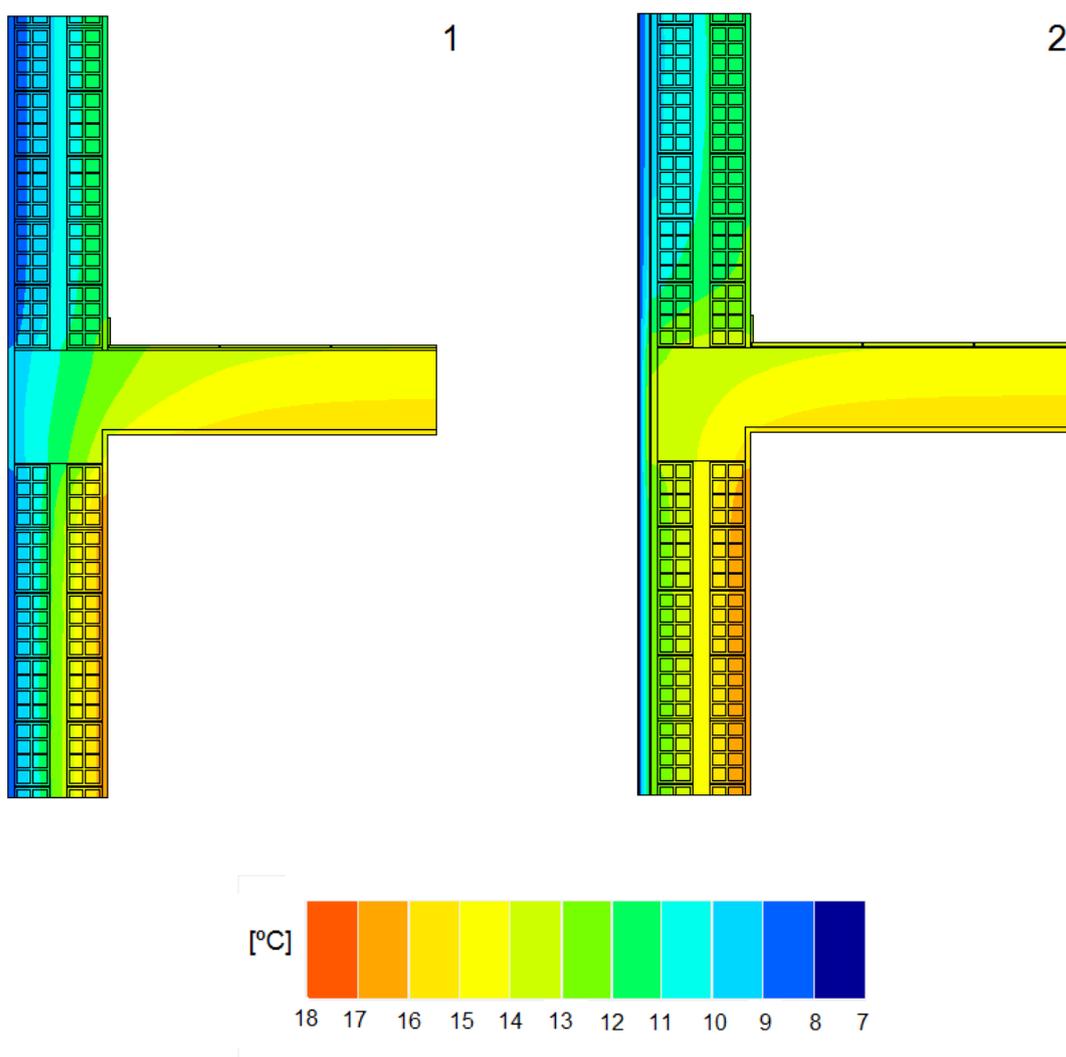


Figura 6.9 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (1) Solução existente, (2) ETICS com 3 cm de EPS.

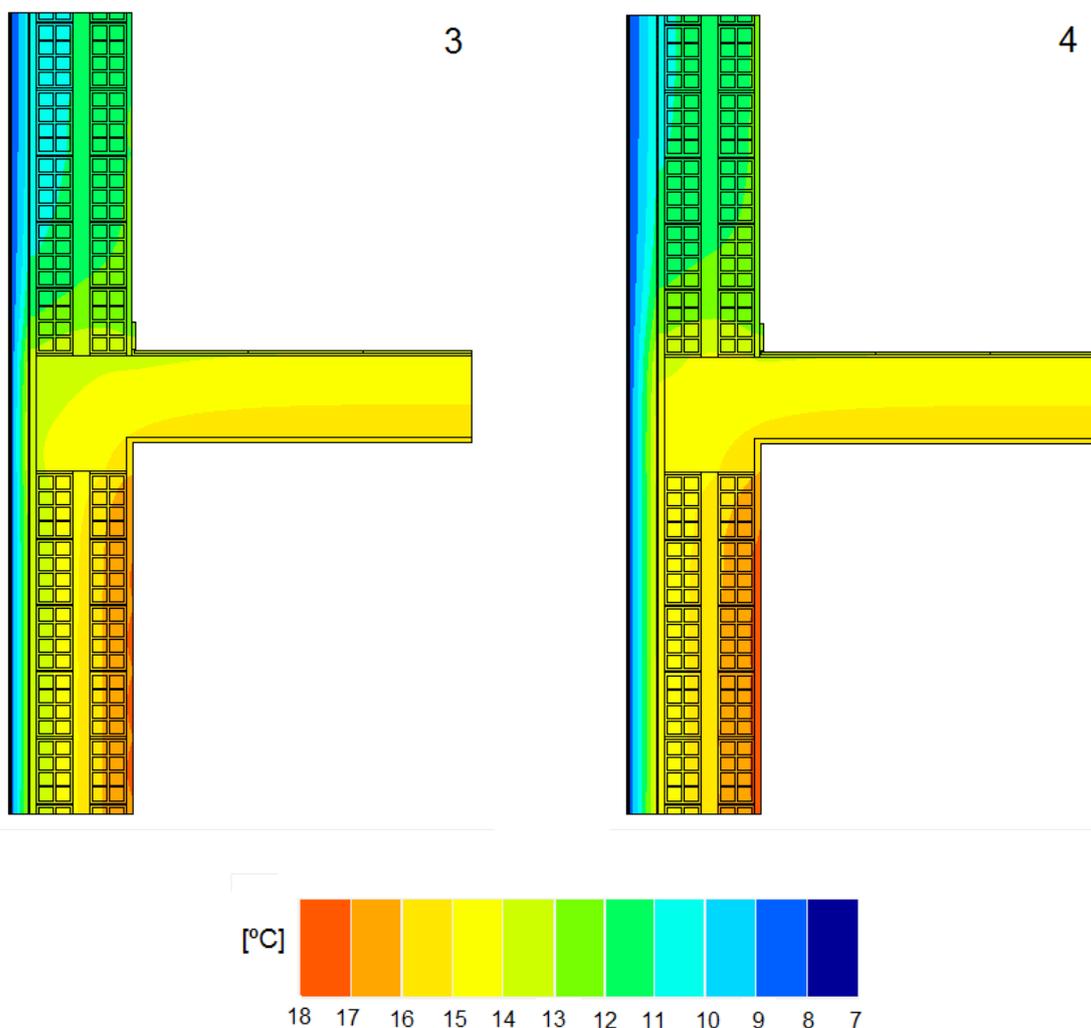


Figura 6.10 - Comparação entre a distribuição de temperaturas. (3) ETICS com 5 cm de EPS, ETICS com 8 cm de EPS.

A colocação do sistema ETICS, introduz uma camada de isolamento ao longo do pormenor construtivo, que anteriormente não possuía qualquer tipo de isolamento. Esta mudança traduz-se numa melhoria significativa do comportamento térmico da envolvente. A adopção do sistema EPS30 revela aumentos de cerca de 3°C no paramento exterior do piso aquecido e de cerca de 1°C no piso não aquecido. No paramento interior as temperaturas aumentam também, embora de maneira menos significativa, cerca de 1°C em ambos os pisos. Tal como se havia verificado para a mesma zona do edifício 1, a utilização de placas de isolamento com uma maior espessura, resulta na uniformização das temperaturas nos paramentos interior e exterior. No entanto neste edifício este fenómeno acentua-se, quando se utiliza um sistema EPS80.

7. CONCLUSÕES

7.1. Conclusões

A parte experimental do presente trabalho, que envolveu a recolha dos termogramas, foi efectuada numa só noite. Os ensaios foram efectuados no final do mês de Março, uma vez que foi a única data em que se reuniram as condições meteorológicas mínimas necessárias para a realização dos mesmos. Este aspecto foi uma das maiores condicionantes ao nível dos termogramas obtidos, uma vez que o material utilizado foi o recolhido nessa data. Teria sido benéfico realizar mais ensaios de forma a poder ter mais material para análise, e também para poder efectuar uma análise mais completa dos edifícios. Outra condicionante de realizar os ensaios todos na mesma noite foi a do tempo disponível para fazer os ensaios, uma vez que estes foram realizados a um domingo a uma hora tardia, e havia a preocupação de causar o mínimo de transtorno e perturbação aos moradores.

Os cálculos da emissividade e da temperatura aparente reflectida, são relativamente simples quando realizados num ambiente controlado, no entanto o seu cálculo correcto in-situ é mais complicado, especialmente no exterior, em que as condições atmosféricas são variáveis e afectam facilmente os valores medidos.

Os objectivos propostos no início do trabalho foram cumpridos. O objectivo principal, que passava por avaliar a qualidade térmica da envolvente dos edifícios através da comparação entre o método da termografia infravermelha e o método numérico, foi conseguido e obtiveram-se seguintes conclusões:

De modo geral na comparação dos resultados obtidos através dos dois métodos, os resultados obtidos através da termografia infravermelha apresentaram uma maior variação na análise de zonas pelo exterior, e a análise numérica apresentava maior variação na análise pelo interior.

Nas zonas de pilar e na zona mais próxima dos pilares as temperaturas registadas pela termografia foram sempre superiores, indicando um efeito de ponte térmica mais acentuado do que o obtido através da análise numérica.

Nas análises efectuadas pelo exterior, os valores produzidos pela análise numérica apresentaram sempre uma variação menor do que os obtidos através da termografia, e de modo geral estes valores foram inferiores, o que indica que se verifica uma maior perda de calor através da envolvente.

Na recolha do termograma na zona exterior do quarto do edifício 1, é possível que tenha ocorrido algum erro, uma vez que este apresenta algumas diferenças relativamente aos outros termogramas recolhidos em zonas semelhantes.

As maiores diferenças entre métodos encontrados em algumas zonas do edifício 1, sugerem que a camada de isolamento térmico, poderá apresentar um desempenho mais fraco.

Analisando de forma crítica os resultados da metodologia proposta, os resultados foram satisfatórios, sendo que em termos de comportamento geral da distribuição de temperaturas, foram obtidos resultados semelhantes através dos dois métodos.

No objectivo secundário do trabalho, os resultados obtidos também foram interessantes. Nas propostas de melhoria utilizando o sistema ETICS, no caso do edifício 1, e uma vez que já existe uma camada de isolamento térmico, a adopção do sistema EPS30 (passando neste caso a existir 6 cm de isolamento térmico) parece ser suficiente, para que o comportamento do edifício fique mais próximo do ideal, e sem nenhuma análise ou estudo complementar, seria a recomendação. No caso do edifício 2, na qual não existe isolamento térmico, fica a dúvida se a solução EPS30 seria suficiente, ou se em contrapartida seria mais indicado adoptar o sistema EPS50. Em qualquer dos casos a adopção do sistema EPS80 seria excessiva, uma vez que a melhoria introduzida não é muito significativa, relativamente às outras soluções propostas.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Em futuros trabalhos realizados no mesmo domínio, seria interessante efectuar os ensaios termográficos em diferentes períodos do dia, e com diferentes condições atmosféricas. Seria também interessante comparar diversos edifícios, com diferentes datas de construção de forma determinar a influência do envelhecimento dos materiais construtivos no desempenho térmico, e a forma como estes afectam a distribuição de temperaturas nas envolventes.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SOUSA, João. – *O paradigma da eficiência energética dos edifícios*. Revista Edifícios e Energia Novembro/Dezembro 2012
- [2] MENDONÇA, Luís V. et al – *A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios*. Spybuilding (JEM 2013)
- [3] BARREIRA, Eva - *Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios, FEUP, 2004.
- [4] FLIR Systems – *Manual do utilizador*. 2010
- [5] FROTA, Anésia B., SCHIFFER, Sueli R. – *Manual do conforto térmico*. Studio Nobel, 5ª Edição 2001.
- [6] RODRIGUES, António M. et al -*Térmica de Edifícios*. Edições ORION, Lisboa, Março 2009.
- [7] CORVACHO, Maria H - *Pontes térmicas – Análise do fenómeno e proposta de soluções*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP, 1996.
- [8] FLIR Systems – *Thermacam B4 User´s Manual*. 2006.
- [9] FLIR Systems - *Infrared Guidebook for Building Applications*. Flir Systems AB, Infrared Training Centre, 2009.
- [10] TESTO – *Pocket Guide Thermography – Theory, Practical Application, Tips and Tricks*. 2009.
- [11] WARDLAW, J., GRYKA, M., WANNER, F., BROSTOW, G., KAUTZ, J. - *A new approach to thermal imaging visualisation*. EngD Group Project, University College London 2010.
- [12] ASTM: E 1862-97 Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature using Infrared Imaging Radiometers.
- [13] PHYSIBEL – BISCO – *computer program to calculate two-dimensional steady state heat transfer in free form objects*. Version 9.0w 2008.
- [14] EN ISO 10211 – 2: 2001 - *Thermal bridges in building construction -- Calculation of heat flows and surface temperatures -- Part 2: Linear thermal bridges*.

- [15] VEIGA, Maria do R.; MALANHO, Sofia - *Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS): Comportamento global e influência dos componentes*. 3º Congresso Português de Argamassas de Construção. Lisboa: LNEC, 2010
- [16] LNEC - *Regras para a concessão de uma aprovação técnica europeia (eta) ou de um documento de homologação (dh) a sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETICS)*. 2010
- [17] FREITAS, Vasco P. – *Isolamento térmico de fachadas pelo exterior: reboco delgado armado sobre poliestireno expandido*. ETICS, Relatório – HT 191A/02. Porto, 2002.
- [18] WEBER – Manual técnico Weber.therm – isolamento térmico de fachadas.
- [19] SAINT-GOBAIN WEBER – Ficha técnica – Sistema Weber.therm classic. 2012
- [20] EN ISO 10211: 2007 - *Thermal bridges in building construction -- Heat flows and surface temperatures -- Detailed calculations*.
- [21] DECRETO-LEI nº 80/2006 - *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*.
- [22] DECRETO-LEI nº 118/2013 - *Sistema de Certificação Nacional (SCE), Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS)*.
- [23] SANTOS, Carlos A.; MATIAS, Luís - *Coefficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios – ITE 50*. LNEC, Lisboa, 2006.
- [24] ADENE – *Princípios orientadores da revisão da legislação na área dos edifícios – Conferência mais energia. Mais eficiência* – Lisboa. Novembro 2012.
- [25] EN 13187:1999 – *Thermal performance of buildings, qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method*.
- [26] EN ISO 18434-1:2008 - *Condition monitoring and diagnosis of machines – Thermography*.
- [27] HENRIQUES, Fernando - *Humidade em Paredes*. LNEC, Lisboa, 1994.
- [28] LI, Z. J. *et al.* - *Application of infrared thermography technique in building finish evaluation*. *Journal of Nondestructive Evaluation*. ISSN 0195-9298. Vol. 19, n.º 1 (2000), p. 11-19.

- [29] GRINZATO, E.; BISON, P. G.; MARINETTI, S. - *Monitoring of ancient buildings by the thermal method. Journal of Cultural Heritage*. ISSN 12962074. Vol. 3, n.º 1 (2002), p. 9.
- [30] OCAÑA, S. M.; GUERRERO, I. C.; REQUENA, I. G. - *Thermographic survey of two rural buildings in Spain*. Energy and Buildings. ISSN 0378-7788. Vol. 36, n.º 6 (2004), p. 515-523.
- [31] WOERNER, T., HARRIMAN, L., MONROE, B., THOMPSON, J., LEATHERMAN, J. - *Exterior building envelope inspections using thermal infrared imaging*. Public Building Services of the U.S. General Services Administration, 2006.
- [32] CANDORÉ, J. C. [et al.]- *Helps with the thermal diagnosis of the building : Detection of defects of insulation by stimulated infra-red thermography: 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. Poland, 2008.
- [33] SUONKETO, J., KORPI, M.; AALTONEN, A.- *Detecting points of unintentional ventilation*. 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering. Nantes, France, 2009.
- [34] SNELL J., SPRING R. - *Nondestructive Testing of Building Envelope Systems Using Infrared Thermography*. Snell Infrared Montpelier, Vermont, 2002.
- [35] WILD W. - *Application of Infrared Thermography in Civil Engineering*. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 4 (2007), p. 436-444.
- [36] KALAMEES, T. - *Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia*. Building and Environment. ISSN 0360-1323. Vol. 42, n.º 6 (2007), p. 2369-2377.
- [37] JAWORSKI, J.- *The infrared thermography of buildings proceeding its surrounding and their thermal performance*. 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Poland, 2008.
- [38] WRÓBEL, A., KISILEWICZ, T.- *Detection of thermal bridges - aims, possibilities and conditions*. 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Poland, 2008.
- [39] KISILEWICZ, T., WRÓBEL, A.- *Quantitative infrared wall inspection*. 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Canada, 2010.

[40] Fokaides, P.A., Kalogirou, S.A. - *Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes*. Appl Energy, 88 (2011), p. 4358–4365

[41] GONZÁLEZ-AGUILERA, D., LAGUELA, S., & RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, P. - *Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades*. Energy and Buildings, 65 (2013), p. 29–36.

[42] EDIS, Essem., FLORES-COLEN, Inês., BRITO, Jorge de. - *Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding*. Construction and Building Materials 51,(2014), p. 187–197.

ANEXOS

Anexo I - Guião para realização de uma inspeção termográfica

Princípios da inspeção termográfica

- a) Determinar a distribuição de temperaturas da superfície em análise, através da medição da temperatura radiante aparente obtida através da câmara termográfica.
- b) Determinar se distribuição de temperaturas da superfície em análise é normal, e se esse não for o caso, qual a origem das anomalias.
- c) Cálculo do tipo e extensão das anomalias verificadas.

As anomalias registadas geralmente têm origem em defeitos ao nível do isolamento térmico, à existência de humidade no elemento em análise, ou à existência de fugas de ar através da envolvente. Para determinar a origem das anomalias, podem ser usados termogramas de referência como base para comparação. Quando se recorre a termogramas de referência, é necessário especial atenção, uma vez que estes só devem ser usados em casos em que o elemento em análise possua as mesmas características construtivas do elemento retratado. É igualmente necessário, que as características ambientais durante a realização do ensaio, sejam semelhantes às que se verificaram durante a recolha dos termogramas de referência.

Requisitos ao nível do equipamento

Uma câmara termográfica é um aparelho bastante sensível, e cuja utilização para a realização de um ensaio está dependente do cumprimento de uma série de requisitos. Assim sendo, o aparelho tem de apresentar as seguintes características:

- a) Estar equipado com um sensor de radiação infravermelha que opere numa gama superior aos 2 μm . Possuir a capacidade para captar radiação aparente e com resolução suficiente.
- b) Estar equipado com um sistema para visualização de uma imagem térmica da temperatura radiante aparente da superfície em análise, e ter capacidade de captar e guardar essa imagem.
- c) Estar equipado com um sistema que permita a determinação dos níveis de temperatura da superfície em análise.
- d) Possuir um sistema de suporte (tripé) que permita ao equipamento estar estabilizado durante a realização do ensaio. Este aspecto é muito importante uma vez que não pode haver qualquer perturbação no aparelho durante o processo de recolha das imagens térmicas.

Requisitos para a realização de um ensaio termográfico

Para a realização de um ensaio termográfico é necessário que se conjuguem vários elementos, de forma a obter um resultado que espelhe as reais condições em que se encontra o alvo desse mesmo ensaio.

- a) Conhecer as especificações e características do equipamento utilizado.
- b) Conhecer as características da envolvente do edifício, o tipo e a localização dos sistemas de aquecimento, os elementos estruturais e o tipo de isolamento térmico existente.
- c) As propriedades dos materiais do revestimento.
- d) Os factores climáticos
- e) Os acessos para a realização da inspecção
- f) As influências ambientais
- g) Outros factores relevantes

Para a que se possa proceder à realização do ensaio, a diferença de temperatura através da envolvente, deve ser suficiente para permitir a detecção de irregularidades térmicas.

O ensaio deve ser levado a cabo quando as temperaturas sejam constantes, ou seja, em períodos em que não se registem grandes variações da temperatura exterior ou interior. Para tal devem ser evitados períodos de exposição solar directa, ou quando se registre uma velocidade do vento significativa.

Este conjunto de requisitos deve ser considerado de acordo com o edifício em análise, as características da envolvente, do equipamento utilizado e do clima local.

Procedimentos para realização do ensaio

Os desenhos e outros documentos relativos à envolvente do edifício devem ser previamente consultados e analisados.

A emissividade da superfície deve ser estimada a partir de tabelas de referência ou através de método prático.

Deve ser registada a informação sobre a temperatura exterior, nebulosidade, precipitação, possível humidade na envolvente, condições do vento e a orientação das fachadas, de acordo com os pontos cardeais.

Devem ser calculados os efeitos produzidos por ventilação ou fontes de calor instaladas no edifício. Se possível, fontes de calor que possam interferir com o resultado do ensaio devem ser desligados antes

do início do mesmo. Peças de mobiliário, quadros ou outros objectos que possam influenciar os resultados devem igualmente ser removidos antes do início do ensaio.

Antes do início do ensaio devem ser determinadas a temperatura interior e exterior com um grau de incerteza máximo de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Tendo em conta as condições no início do ensaio, e de acordo com as instruções, o equipamento deve ser ajustado nos parâmetros do alcance, abertura da lente e sensibilidade, de forma a melhor captar a distribuição de temperaturas expectável.

A variação da temperatura radiante aparente da superfície em análise, deve ser medida com uma incerteza máxima de $\pm 10\%$ ou de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (Adopta-se o valor que for menor). Em casos em que seja necessário um valor de referência este deve ser determinado com uma incerteza máxima de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

O ensaio deve começar pela realização de um teste preliminar na superfície da envolvente.

Partes da envolvente de especial interesse, ou que exibam anomalias devem ser analisadas com maior detalhe.

Os termogramas devem ser obtidos de partes da envolvente que estão a ser analisadas. Esta recolha deve compreender partes aparentemente sem defeito, assim como partes onde se suspeita que existam anomalias.

De forma a determinar se a variação da radiação na superfície é devida a reflexões a partir de outras superfícies, devem ser efectuadas medições a partir de diferentes posições, uma vez que a reflexão varia consoante a posição.

O local onde cada termograma foi recolhido deve ser representado numa planta ou esboço do edifício, para fácil identificação do local a que corresponde.

O padrão da temperatura radiante aparente deve ser determinado de acordo com as instruções de utilização do equipamento. É essencial que os efeitos da emissividade e da reflexão sejam considerados e eventualmente compensados, de forma a obter uma representação fiel da variação das temperaturas na temperatura.

Se os termogramas indicarem a existência de perdas de ar, estas devem ser verificadas através da medição da velocidade do ar.

Se for considerado necessário, os factores que influenciam o coeficiente de transferência de calor na superfície interior da envolvente (corrente de ar, fluxo de calor proveniente de aparelhos, condensação de humidade) devem ser calculados.

Avaliação dos termogramas

A distribuição de temperaturas prevista deve ser determinada utilizando desenhos, plantas e documentos referentes ao edifício. Podem ser adoptados termogramas de referência de outros edifícios, desde que as características desse edifício sejam semelhantes, e que as condições em que os termogramas foram obtidos sejam idênticas.

A distribuição de temperaturas deve ser avaliada a partir dos termogramas recolhidos. Se esta for diferente do esperado, deve ser efectuado um registo da ocorrência. Quando são detectadas irregularidades, é necessário compreender qual a sua origem. Caso não se consiga atribuir a irregularidade ao *design* da envolvente, a efeitos provocados por fontes de calor ou a variações quer na emissividade quer no coeficiente de transferência de calor, então a irregularidade deve ser considerada um erro.

Irregularidades no isolamento térmico, estanquidade ao ar, ou a nível estrutural produzem determinados padrões de temperaturas superficiais. Certos tipos de anomalia assumem formas específicas num termograma. Na análise de um termograma, o seguinte deve ser considerado:

- a) Uniformidade da temperatura radiante aparente, relativamente a partes da superfície de zonas semelhantes onde não existem pontes térmicas.
- b) A regularidade e incidência com que surgem zonas quentes ou frias, como por exemplo, na zona das vigas ou cantos.
- c) A localização e a forma característica das zonas quentes e das zonas frias.
- d) A diferença de temperatura entre as zonas normais, e as zonas quentes e zonas frias.

Exemplos de características padrão

Algumas anomalias podem ser facilmente identificadas nos termogramas, uma vez que se manifestam geralmente sempre da mesma forma. O que se segue são alguns exemplos do referido acima:

- a) Perdas de ar através da envolvente geralmente resultam em formas irregulares com contornos desiguais, e grandes variações de temperatura.
- b) A falta de isolamento térmico resulta em formas regulares e bem definidas, geralmente não associadas a pormenores construtivos do edifício. Estas anomalias apresentam uma variação de temperatura pequena ao longo da zona afectada.
- c) A presença de humidade na estrutura geralmente origina um padrão com manchas e disperso. As variações de temperatura não são muito acentuadas ao longo da zona afectada.

Sempre que se verifica uma anomalia a sua origem deve ser determinada. A determinação do tipo da anomalia pode ser através de cálculos, investigação recorrendo a outros métodos, por comparação com termogramas de referência, ou simplesmente pela experiência prévia com situações semelhantes. Todas as conclusões relativamente às anomalias, devem ser justificadas e incluídas no relatório termográfico. No caso de anomalias devido a perdas de ar através da envolvente, ou por falta de isolamento, a extensão das mesmas deve ser determinada.

Relatório termográfico

Um ensaio termográfico é composto de um conjunto de termogramas recolhidos em vários pontos do edifício. Os termogramas por si só não são suficientes para a análise de um edifício, pelo que é necessário elaborar um relatório no qual os termogramas são complementados com informações e desenhos sobre vários aspectos do edifício e as condições que se registaram no decorrer do ensaio. Um relatório termográfico deve incluir:

- a) Uma descrição do ensaio realizado.
- b) Uma breve descrição dos pormenores construtivos do edifício (com base em desenhos, plantas, ou outra informação disponível).
- c) O tipo de materiais que constituem a superfície analisada e valores estimados para a emissividade.
- d) A orientação das fachadas de acordo com os pontos cardeais, e uma descrição da zona em torno do edifício (outros edifícios, vegetação, geografia do terreno).
- e) Uma descrição do equipamento utilizado, incluindo marca, modelo e número de série.
- f) Data e hora do ensaio.
- g) A temperatura do ar exterior, incluindo os valores mínimos e máximos registados durante as vinte e quatro horas que antecederem o ensaio, e durante a realização do mesmo.
- h) Informação geral sobre as condições da radiação solar que se verificarem nas doze horas que antecederem o ensaio, e durante a realização do mesmo.
- i) A precipitação, a direcção do vento e velocidade do vento durante a realização do ensaio.
- j) A temperatura do ar interior, e a diferença de temperaturas através da envolvente durante a realização do ensaio.
- k) Quando for considerado necessário, a diferença na pressão atmosférica, entre o lado a favor do vento e o lado contra o vento.
- l) Outros factores relevantes, como súbitas mudanças no estado do tempo.
- m) Registo de qualquer desvio significativo dos requisitos do ensaio.
- n) Esboços ou fotos do edifício, identificando o local onde foram obtidos os termogramas.

- o) Termogramas representativos das zonas analisadas, revelando partes da envolvente onde se encontraram irregularidades. Os termogramas devem ser complementados com informação a descrever o local do edifício representam, assim como a posição da câmara em relação ao local. Cada termograma deve ser analisado de forma crítica, que se deve traduzir num pequeno texto ou comentário. Se possível devem ser obtidos termogramas de zonas sem anomalias para servirem como termo de comparação.
- p) Identificação das partes do edifício que foram sujeitas a análise.
- q) Os resultados da análise a cada anomalia observada, incluindo o tipo e a extensão. As zonas com anomalia devem ser comparadas com zonas semelhantes sem anomalias, e devem ser registadas as diferenças observadas.
- r) Resultados de medidas ou investigações suplementares.

AnexoII - Relatório de Ensaio - Edifício 1



Data da termografia: (23/03/2014)

Requisitos ao nível do Equipamento

O equipamento utilizado no ensaio foi uma câmara termográfica da marca FLIR Systems, modelo ThermaCam B4. Este equipamento cumpre com os requisitos impostos pela Norma Europeia EN 13187:1999, nomeadamente no que diz respeito às capacidades do sensor de infravermelho, que opera na gama entre os 7,5 μm e os 13 μm (a norma impõe que o sensor opere acima dos 2 μm). No que diz respeito aos demais requisitos ao nível do equipamento a ThermaCam B4 permite a visualização da radiação aparente da superfície em análise, exibindo os diferentes níveis de temperatura da mesma, permitindo guardar as imagens captadas na sua memória interna. Foi utilizado um tripé como suporte para a câmara de forma a garantir a estabilidade do equipamento durante o ensaio, tal como indicado pela norma.

Requisitos para a realização do ensaio

A preparação prévia é fundamental para a realização de um ensaio termográfico. O conhecimento acerca do equipamento a utilizar e sobre o objecto em análise são fundamentais para que o ensaio produza os resultados esperados.

Ao nível do equipamento, foram efectuadas algumas medições prévias de forma a criar familiaridade com o equipamento, com as suas funcionalidades e a forma correcta de o operar.

Foi efectuado um levantamento das características do edifício, de forma a seleccionar as zonas a analisar. Foi igualmente garantido que o acesso total ao edifício, facilitando a realização do ensaio.

O edifício analisado está equipado com um sistema de aquecimento, que consiste numa caldeira (Figura 2) alimentada a gásóleo que por sua vez distribui o calor através de um conjunto de radiadores (Figura 3) distribuídos pelas divisões do edifício. O sistema foi instalado à cerca de oito anos e a sua disposição é conforme o representado na figura 1.

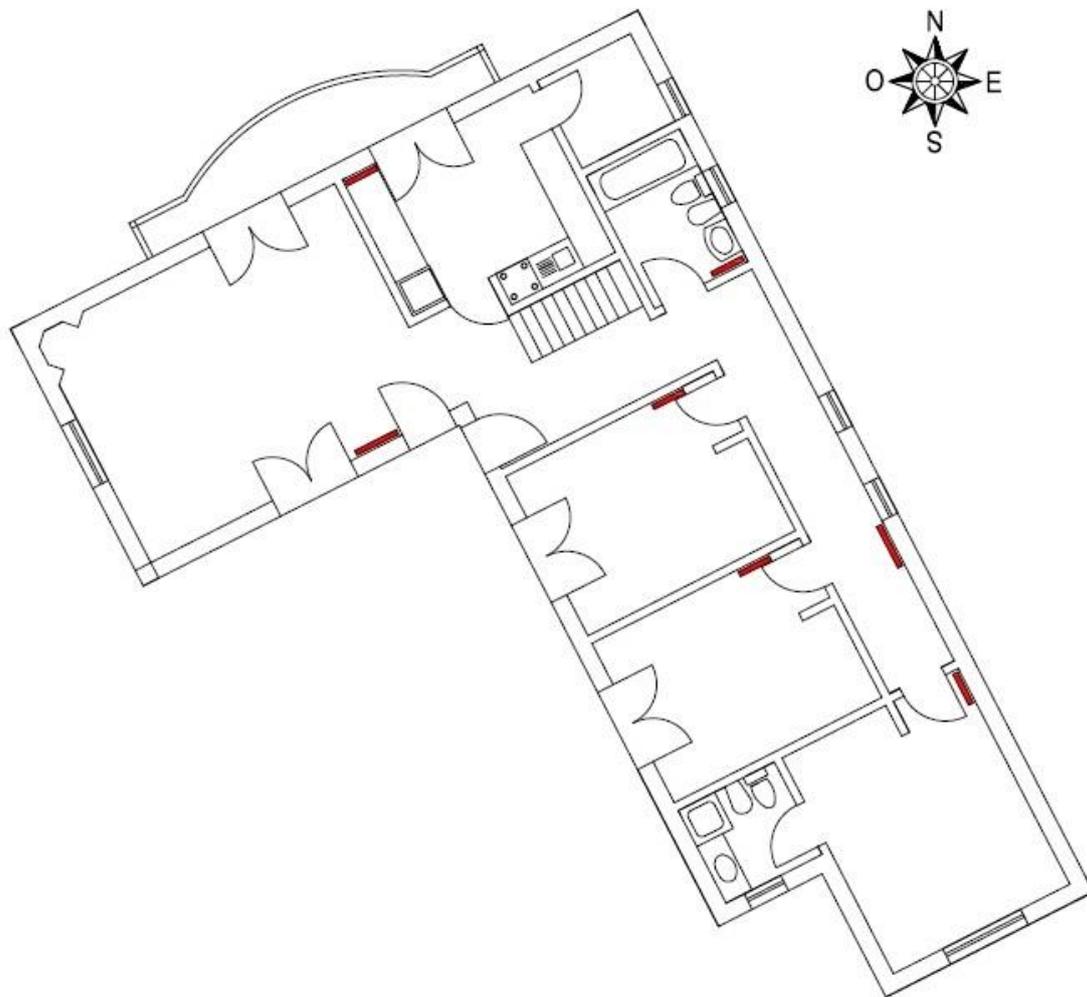


Figura 1 – Disposição dos radiadores no edifício, representados a vermelho.



Figura 2 – Caldeira do sistema de aquecimento



Figura 3 – Radiadores do sistema de aquecimento.

Informação complementar ao relatório termográfico

A informação que se segue serve como complemento ao relatório termográfico efectuado no edifício 1. O modelo seguido é o descrito no anexo I.

a)

O ensaio foi realizado de acordo com o planeado, tendo sido recolhidos termogramas de duas divisões distintas do edifício. As divisões em análise foram o quarto principal e sala de estar, uma vez que são as divisões do edifício onde os seus ocupantes passam mais tempo.

b)

O projecto deste edifício data de 1992, sendo que a sua construção foi concluída já no ano de 1993. O edifício é constituído por paredes exteriores duplas, com caixa de ar e isolamento em Poliestireno expandido (EPS) de 2 cm, e paredes interiores simples rebocadas de acordo com a Figura 4.



Figura 4 – Parede dupla (esquerda), parede simples (direita).

c)

As paredes analisadas são de alvenaria de tijolo, e possuem reboco de argamassa à base de cimento e areia. A emissividade seleccionada para a realização do ensaio foi de 0,86. Este valor é o valor que vem tabelado no menu da câmara para paredes de reboco (plaster).

d)

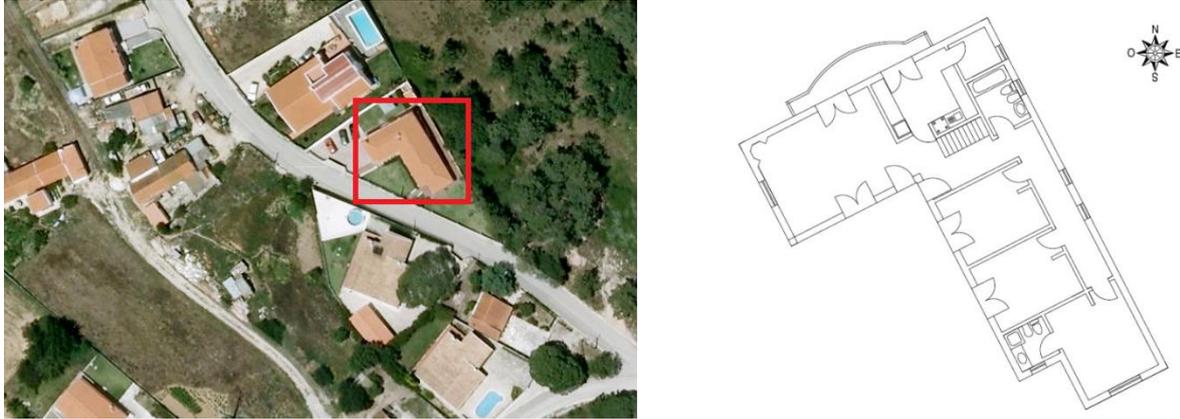


Figura 5 – Localização do edifício.

O edifício está localizado numa zona com baixa densidade populacional e onde as casas estão em pequenos aglomerados. Do lado da fachada com orientação Norte-Nascente existe um terreno baldio com bastante vegetação, maioritariamente árvores de grande e médio porte.

e)

O equipamento utilizado no ensaio foi uma Câmara termográfica Flir thermacam modelo B4 número de série 30100540.



Figura 6 - Câmara termográfica Flir thermacam B4

f)

O ensaio foi realizado no dia 23 de Março de 2014, teve início às 22h15.

g)

Nas 24 horas que antecederam o ensaio a temperatura exterior do ar era de 8,4 °C. Nas 24 horas que antecederam o ensaio verificou-se uma temperatura máxima de 20,5 °C e uma mínima de 7,1 °C.

h)

Nas 12 horas que antecederam a realização do ensaio o céu esteve de modo geral limpo, apresentando alguma nebulosidade no período entre as 10h00 e as 12h00. Uma vez que o ensaio foi realizado durante a noite, não houve radiação solar durante o decorrer do mesmo. O céu apresentava-se limpo e sem nebulosidade.

i)

Durante a realização do ensaio não se registou qualquer precipitação. No que diz respeito à acção do vento, no decorrer do ensaio não se verificava nenhuma brisa digna de registo.

j)

A temperatura interior registada oscilava entre os 17-17,5 °C verificando-se uma variação de temperatura ao longo da envolvente de cerca de 9 °C.

k)

Não foi considerado necessário contabilizar diferenças de pressão atmosférica, uma vez que a acção do vento não era significativa, e o edifício não possui equipamento de ventilação mecânica.

l)

Não se verificou qualquer mudança ao nível das condições atmosféricas.

m)

O ensaio decorreu sem qualquer tipo de contratempo, e sempre de acordo com os objectivos traçados.

n)

No relatório termográfico estão devidamente assinaladas as locais de onde foram recolhidos os termogramas.

o)

Uma inspecção termográfica deste tipo normalmente é efectuada quando há necessidade de detectar anomalias e determinar a sua origem. O objectivo desta inspecção passava por efectuar um levantamento do comportamento térmico da envolvente do edifício. Dada a natureza do ensaio não foram detectadas anomalias ao nível de infiltrações, danos no revestimento ou isolamento, entre outras anomalias que podem ser detectadas num ensaio termográfico.

p)

As zonas do edifício que foram analisadas estão representadas no relatório termográfico.

q)

Não há nada a registar neste campo.

r)

Não foram efectuados qualquer ensaio ou investigação complementar.

Anexo III - Relatório de Ensaio - Edifício 2



Data da termografia: (23/03/2014)

Requisitos ao nível do Equipamento

O equipamento utilizado no ensaio foi uma câmara termográfica da marca FLIR Systems, modelo ThermaCam B4. Este equipamento cumpre com os requisitos impostos pela Norma Europeia EN 13187:1999, nomeadamente no que diz respeito às capacidades do sensor de infravermelho, que opera na gama entre os 7,5 μm e os 13 μm (a norma impõe que o sensor opere acima dos 2 μm). No que diz respeito aos demais requisitos ao nível do equipamento a ThermaCam B4 permite a visualização da radiação aparente da superfície em análise, exibindo os diferentes níveis de temperatura da mesma, permitindo guardar as imagens captadas na sua memória interna. Foi utilizado um tripé como suporte para a câmara de forma a garantir a estabilidade do equipamento durante o ensaio, tal como indicado pela norma.

Requisitos para a realização do ensaio

A preparação prévia é fundamental para a realização de um ensaio termográfico. O conhecimento acerca do equipamento a utilizar e sobre o objecto em análise são fundamentais para que o ensaio produza os resultados esperados.

Ao nível do equipamento, foram efectuadas algumas medições prévias de forma a criar familiaridade com o equipamento, com as suas funcionalidades e a forma correcta de o operar.

Foi efectuado um levantamento das características do edifício, de forma a seleccionar as zonas a analisar. Foi igualmente garantido que o acesso total ao edifício, facilitando a realização do ensaio.

O edifício analisado está equipado com um sistema de aquecimento, que consiste numa caldeira (Figura 2) alimentada a gasóleo que por sua vez distribui o calor através de um conjunto de radiadores (Figura 3) distribuídos pelas divisões do edifício. O sistema foi instalado à cerca de seis anos e a sua disposição é conforme o representado na Figura 1.

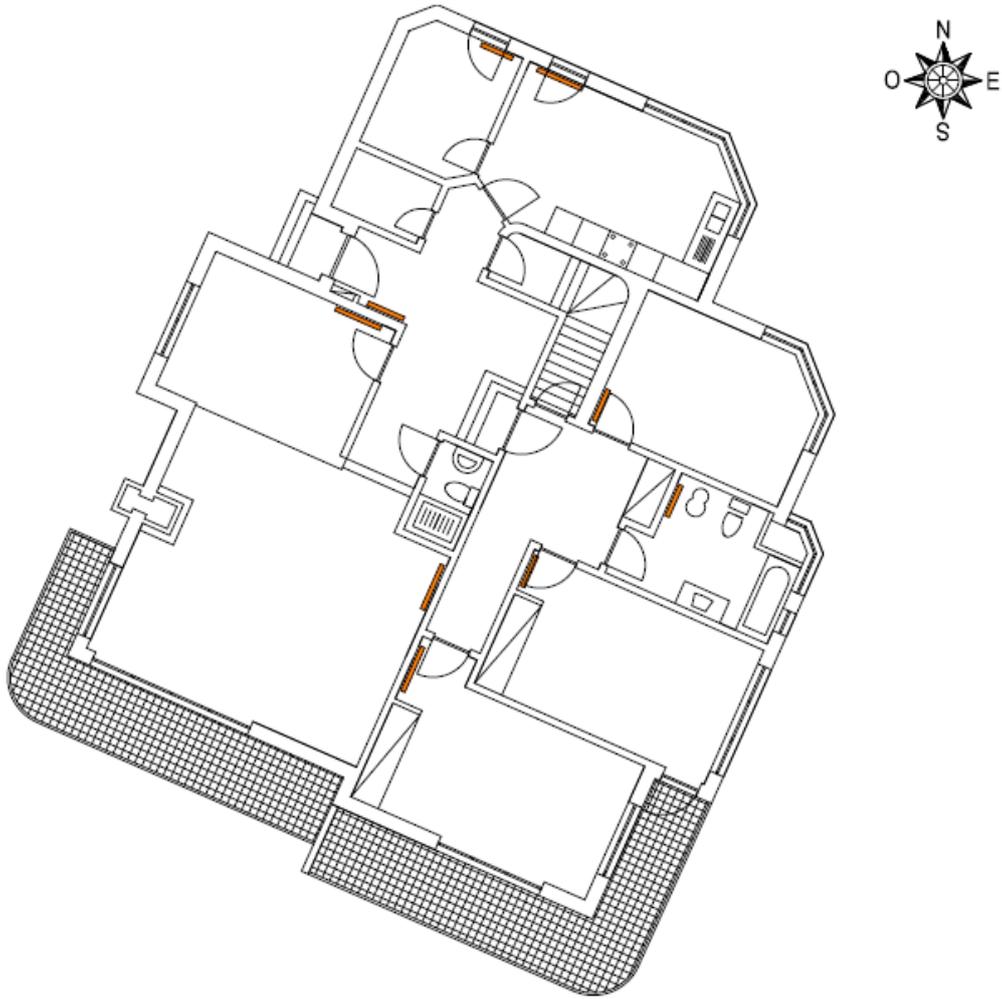


Figura 1 – Disposição dos radiadores no edifício, representados a laranja.



Figura 2 – Caldeira do sistema de aquecimento



Figura 3 – Radiador e toalheiro do sistema de aquecimento.

Informação complementar ao relatório termográfico

A informação que se segue serve como complemento ao relatório termográfico efectuado ao edifício 2. O modelo seguido é o descrito no anexo I.

a)

O ensaio foi realizado de acordo com o planeado, tendo sido recolhidos termogramas de duas zonas de fachadas distintas. As divisões em análise pelo interior foram na zona da sala de estar.

b)

O projecto deste edifício data de Março de 1985. O edifício é constituída por paredes exteriores duplas, com caixa de ar sem isolamento térmico, e paredes interiores simples rebocadas de acordo com a figura 4.

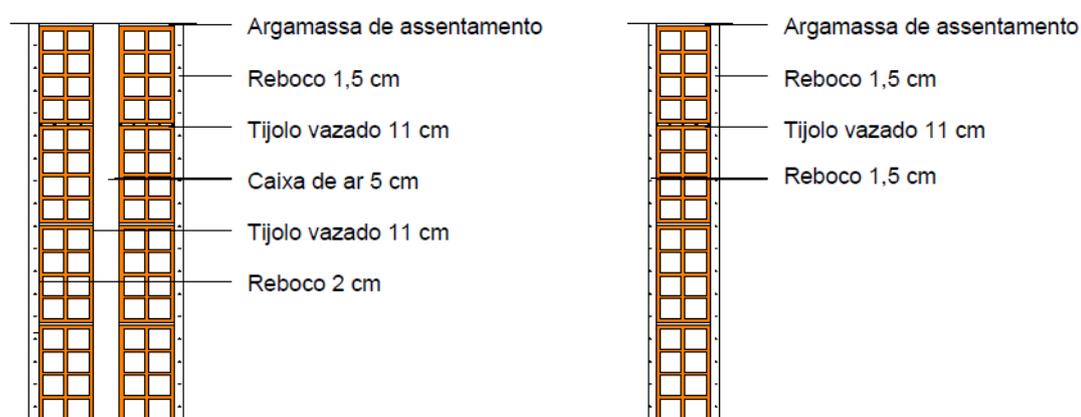


Figura 4 – Parede dupla (esquerda), parede simples (direita).

c)

As paredes analisadas são de alvenaria de tijolo, e possuem reboco de argamassa à base de cimento e areia. A emissividade seleccionada para a realização do ensaio foi de 0,86. Este valor é o valor que vem tabelado no menu da câmara para paredes de reboco (plaster).

d)

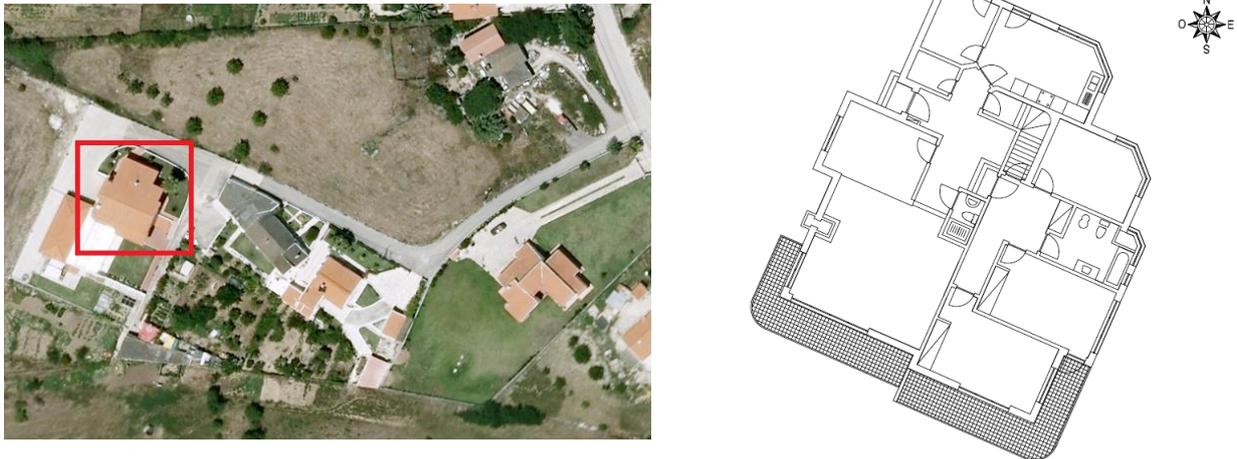


Figura 5 – Localização do edifício.

O edifício encontra-se localizado num pequeno aglomerado de casas, numa zona com baixa densidade populacional. Do lado da fachada com orientação Sul-Nascente existe outra casa, sendo que dos outros lados apenas existe terreno livre e com pouca vegetação.

e)

O equipamento utilizado no ensaio foi uma Câmara termográfica Flir thermacam modelo B4 número de série 30100540.



Figura 6 - Câmara termográfica Flir thermacam B4

f)

O ensaio foi realizado no dia 23 de Março de 2013 e teve início às 23h00.

g)

Na altura do início do ensaio a temperatura exterior do ar era de 8 °C, na altura em que o ensaio terminou registavam-se 7,7 °C. Nas 24 horas que antecederam o ensaio verificou-se uma temperatura máxima de 20,6 °C e uma mínima de 7,1 °C.

h)

Nas 12 horas que antecederam a realização do ensaio o céu esteve de modo geral limpo, apresentando alguma nebulosidade no período entre as 10h00 e as 12h00. Uma vez que o ensaio foi realizado durante a noite, não houve radiação solar durante o decorrer do mesmo. O céu apresentava-se limpo e sem nebulosidade.

i)

Durante a realização do ensaio não se registou qualquer precipitação. No que diz respeito à acção do vento, no decorrer do ensaio não se verificava nenhuma brisa digna de registo.

j)

A temperatura interior registada oscilava entre os 17,4-17,6 °C verificando-se uma variação de temperatura ao longo da envolvente de cerca de 9 °C.

k)

Não foi considerado necessário contabilizar diferenças de pressão atmosférica, uma vez que a acção do vento não era significativa, e o edifício não possui equipamento de ventilação mecânica.

l)

Não se verificou qualquer mudança ao nível das condições atmosféricas.

m)

O ensaio decorreu sem qualquer tipo de contratempo, e sempre de acordo com os objectivos traçados.

n)

No relatório termográfico estão devidamente assinaladas as locais de onde foram recolhidos os termogramas.

o)

Uma inspecção termográfica deste tipo normalmente é efectuada quando à necessidade de detectar anomalias e determinar a sua origem. O objectivo desta inspecção passava por efectuar um levantamento do comportamento térmico da envolvente do edifício. Dada a natureza do ensaio não

foram detectadas anomalias ao nível de infiltrações, danos no revestimento ou isolamento, entre outras anomalias que podem ser detectadas num ensaio termográfico.

p)

As partes do edifício que foram analisadas estão representadas no relatório termográfico.

q)

Não há nada a registar neste campo.

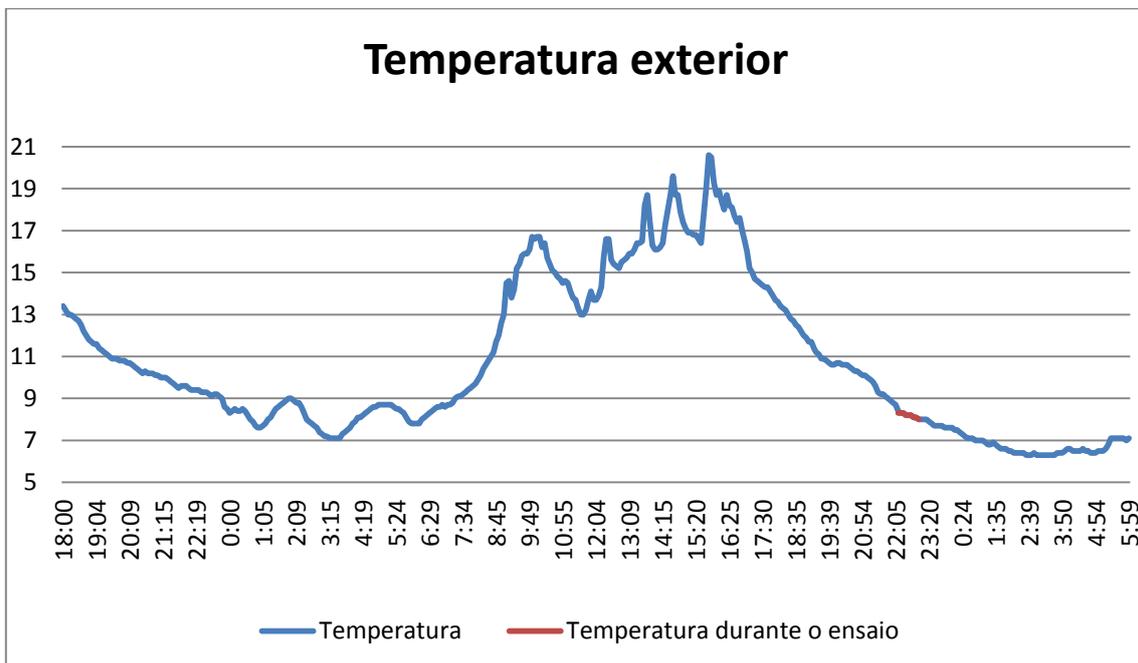
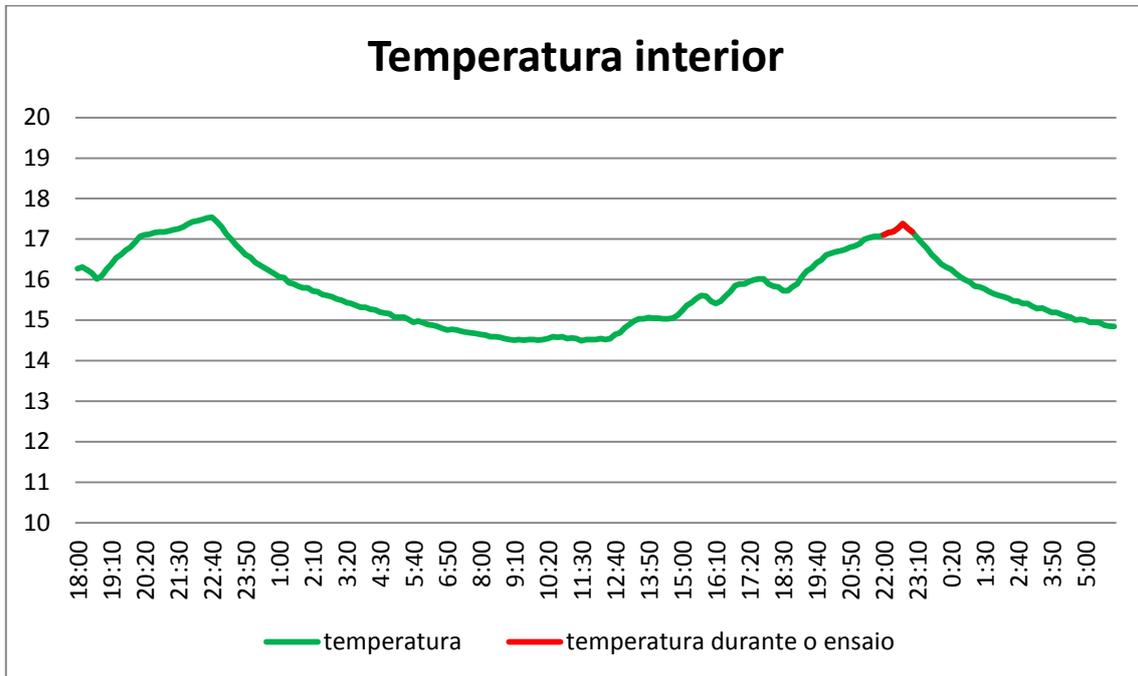
r)

Não foram efectuados qualquer ensaio ou investigação complementar.

Anexo IV – Registo de temperaturas

Para a realização dos ensaios foi efectuado um acompanhamento das temperaturas interior e exterior em ambos os edifícios. Para o controlo das temperaturas interiores foi colocado um termohigrómetro em cada um dos edifícios, efectuando medições de forma contínua com intervalos de 10 minutos entre medições. Para as temperaturas exteriores efectuou-se a medição da temperatura exterior com recurso a um termómetro, e foram recolhidos dados da estação meteorológica mais próxima de forma a verificar a evolução da temperatura durante o ensaio, e nos períodos que o antecederam e sucederam. O período de acompanhamento das temperaturas iniciou-se às 18h00 do dia 22 de Março de 2014, e teve conclusão às 6:00 do dia 24 de Março de 2014. Foram criados gráficos para uma mais fácil interpretação das temperaturas, sendo que o período durante o qual decorreram os ensaios está assinalado no gráfico com uma cor diferente.

Edifício 1



Edifício 2

