

Retrospectiva e perspetivas futuras da utilização da termografia na inspeção de edifícios

JÚLIO MANUEL CAMPOS DIAS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida

JUNHO DE 2020

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miiec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2019/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, Namorada e Amigos

" Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é concedido."

J. R. R. Tolkien

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, quero agradecer aos meus orientadores, à Professora Eva Barreira e ao Professor Ricardo Almeida, por todo o tempo dispensado, à ajuda prestada e o conhecimento transmitido ao longo do decorrer da dissertação.

De seguida, quero agradecer aos meus pais, por todo o apoio que me deram durante o meu percurso académico, tendo sido a minha grande motivação para seguir em frente.

Quero também agradecer a todos os amigos que me apoiaram e ajudaram nestes últimos anos. A quantidade de matéria que me forçaram a aprender antes da data dos exames e me fazer estudar noite dentro, era o empurrão que necessitava.

Este pequeno paragrafo dedico à minha namorada Filipa Gonçalves. Sem ela esta dissertação não era possível, ou então era, no entanto iria causar muitos cabelos brancos a professores de português a nível nacional. O trabalho que tive, ela teve a dobrar pois de certeza que já leu esta dissertação mais vezes que eu.

Por último, quero agradecer à minha querida avó, madrinha e segunda mãe. Tudo o que faço hoje é por ela. Nunca a esquecerei, porque sei que nunca se esquecerá de mim.

RESUMO

A evolução constante do setor da construção exige soluções inovadoras de inspeção e diagnóstico. Atualmente, o grande objetivo para os edifícios, novos e existentes, é o aumento da sua eficiência energética, de forma a cumprir as metas europeias. No entanto, as anomalias que muitas vezes apresentam durante a fase de serviço podem comprometer esse propósito.

A termografia de infravermelhos, ao longo dos anos, tem sido utilizada cada vez mais no setor construtivo, tendo sido comprovada a sua eficácia na deteção de defeitos associados a variações de temperatura.

O objetivo principal desta dissertação consistiu na definição de uma metodologia que visa garantir a qualidade dos trabalhos realizados e a manutenção de um desempenho adequado durante a fase de utilização, com o auxílio da termografia associada a novas tecnologias como o BIM, RV e RA.

Primeiramente, foi feita uma pesquisa sobre os princípios físicos da termografia, as diferenças entre a termografia ativa e passiva, os tipos de análise de resultados que podem ser realizados e os fatores que influenciam a aquisição de termogramas. De seguida, foi reunida uma grande quantidade de informação sobre como tem sido utilizada a termografia para a inspeção e diagnóstico de edifícios. Por último, foi recolhida e analisada informação sobre novas tecnologias, nomeadamente sobre a sua utilização, vantagens, desvantagens e a sua integração com a termografia de infravermelhos. As várias tecnologias analisadas foram os drones, BIM, Realidade Aumentada e Realidade Virtual.

Por fim, e com base na informação recolhida da literatura, foi definida uma metodologia para ser aplicada a novas construções, que se baseia na fusão da termografia com o BIM, a RV e a RA. Foi possível evidenciar algumas desvantagens ou constrangimentos que atualmente dificultam a implementação desta metodologia, contudo com os futuros avanços tecnológicos, é expectável que sejam ultrapassados. Com a implementação desta metodologia, é expectável que seja garantida a qualidade dos trabalhos realizados em obra, evitar a degradação dos materiais e ajudar em futuras intervenções. É de salientar que esta metodologia não foi testada em casos práticos.

PALAVRAS-CHAVE: Termografia de infravermelhos, Drones, Realidade Virtual, Realidade Aumentada, BIM

ABSTRACT

The constant evolution of the construction sector requires innovative inspection and diagnostic solutions. Today, the major objective for new and existing buildings is to increase their energy efficiency in order to meet European targets. However, the anomalies they often present during the service phase can compromise this purpose.

Over the years, infrared thermography has been increasingly used in the construction sector and its effectiveness in detecting defects associated with temperature variations has been proven.

The main objective of this dissertation was to define a methodology to ensure the quality of the works performed on site and the maintenance of adequate performance during the use phase, with the aid of thermography associated with new technologies such as BIM, VR and AR.

First, research was done on the physical principles of thermography, the differences between active and passive thermography, the types of analysis of results that can be performed and the factors that influence the acquisition of thermograms. Then, a large amount of information was gathered on how thermography has been used for the inspection and diagnosis of buildings. Finally, information was collected and analysed on new technologies, namely their use, advantages, disadvantages and their integration with infrared thermography. The various technologies analysed were drones, BIM, Augmented Reality and Virtual Reality.

Finally, and based on the information gathered from the literature, a methodology was defined to be applied to new constructions, which is based on the fusion of thermography with BIM, VR and AR. It was possible to highlight some disadvantages or constraints that currently hinder the implementation of this methodology, however with future technological advances, it is expected that they will be overcome. With the implementation of this methodology, it is expected that the quality of the works carried out on site will be guaranteed, the degradation of materials will be avoided and assist in future interventions. It should be noted that this methodology has not been tested in practical cases.

KEYWORDS: Infrared Thermography, Drones, Virtual Reality, Augmented Reality, BIM

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1. INTRODUÇÃO.....	 1
1.1. MOTIVAÇÃO DO TEMA.....	1
1.2. INTERESSES E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
 2. FUNCIONAMENTO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS.....	 3
2.1. PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	3
2.2. CONDIÇÕES E PARÂMETROS QUE CONDICIONAM AS INSPEÇÕES TERMOGRÁFICAS.....	7
2.3. TERMOGRAFIA ATIVA E TERMOGRAFIA PASSIVA.....	12
2.4. MÉTODOS DE ANÁLISE RESULTADOS DOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS.....	15
 3. APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS AOS EDIFÍCIOS	 19
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
3.2. APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETECÇÃO DE HUMIDADE	20
3.3. APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETECÇÃO DE DESTACAMENTOS E DELAMINAÇÃO	22
3.4. APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETECÇÃO DE PONTES TÉRMICAS	23
3.5. APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETECÇÃO DE DEGRADAÇÃO E FALHAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO	24

3.6. APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETECÇÃO FUGAS/INFILTRAÇÕES DE AR.....	26
3.7. APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETECÇÃO DE PORMENORES ESCONDIDOS.....	27
3.8. APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA- U	31
3.9. APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS.....	34
4. INTEGRAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS NAS NOVAS TECNOLOGIAS	39
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	39
4.2. TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS E DRONES.....	40
4.2.1. O QUE SÃO OS DRONES?.....	40
4.2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE DRONES	41
4.2.3. EMPREGABILIDADE DA TERMOGRAFIA COM DRONES EM DIFERENTES ÁREAS....	42
4.2.4. UTILIZAÇÃO DE DRONES E TERMOGRAFIA NO SECTOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	46
4.3. TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS E BIM	49
4.3.1. O QUE É BIM?.....	49
4.3.2. OBTENÇÃO DE MODELOS 3D	50
4.3.3. INTEGRAÇÃO DE TERMOGRAFIA EM MODELOS BIM	51
4.4. TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS UTILIZADA EM REALIDADE VIRTUAL E REALIDADE AUMENTADA.....	53
4.4.1. O QUE É A REALIDADE VIRTUAL (RV)?	53
4.4.2. O QUE É A REALIDADE AUMENTADA (RA)?	55
4.4.3. RV, RA E TERMOGRAFIA	56
4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58

5. PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA UMA CONSTRUÇÃO NOVA	61
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	61
5.2. METODOLOGIA	62
5.2.1. CRIAÇÃO DO MODELO BIM DO EDIFÍCIO.....	62
5.2.2. DEFINIÇÃO DO MODELO TÉRMICO E ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO.....	62
5.2.3. FASE DE EXECUÇÃO.....	63
5.2.4. INÍCIO DA FASE DE UTILIZAÇÃO	66
5.2.5. INSPEÇÃO DO EDIFÍCIO NO DECORRER DA FASE DE UTILIZAÇÃO	68
5.2.6. PROCEDIMENTO DE CORREÇÃO DE ANOMALIAS	70
 6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	73
6.1. CONCLUSÕES FINAIS	73
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	74
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO [2].	3
FIGURA 2 - RADIÂNCIA ESPECTRAL DE UM CORPO NEGRO SEGUNDO A LEI DE PLANK PARA UMA DADA TEMPERATURA, EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA [7].	5
FIGURA 3 - A) TERMOGRAMA COM VALOR ALEATÓRIO DE EMISSIVIDADE; B) TERMOGRAMA COM VALOR CORRETO DE EMISSIVIDADE [8].	8
FIGURA 4 – INFLUÊNCIA DO ÂNGULO NO VALOR DE EMISSIVIDADE PARA ALGUNS NÃO-METAIS [3].	9
FIGURA 5 - TERMOGRAMA CAPTADO DURANTE: A) DIA; B) NOITE [12].	9
FIGURA 6 - INFLUÊNCIA DE PADRÕES ESCUROS DE GRANDES DIMENSÕES NA TEMPERATURA SUPERFICIAL [14].	10
FIGURA 7 - INFLUÊNCIA DE PADRÕES ESCUROS DE PEQUENAS DIMENSÕES NOS TERMOGRAMAS [14].	10
FIGURA 8 - TERMOGRAMA INFLUENCIADO POR REFLEXÃO DE TEMPERATURA [14].	11
FIGURA 9 - EFEITO DA REFLETIVIDADE EM AZULEJOS CERÂMICOS [12].	11
FIGURA 10 - INFLUENCIA DO SOMBREAMENTO EM TERMOGRAMAS [14].	12
FIGURA 11 - A) MÉTODO DA TRANSMISSÃO; B) MÉTODO REFLETIVO. (ADAPTADO DE [18]).	13
FIGURA 12 – ESTILOS DE ANÁLISES TERMOGRÁFICAS	14
FIGURA 13 - COMPARAÇÃO ENTRE TERMOGRAMAS OBTIDOS UTILIZANDO A TERMOGRAFIA ATIVA E PASSIVA [22].	15
FIGURA 14 - TERMOGRAMAS DE UM PROVETE COM A BASE IMERSA EM ÁGUA PARA VÁRIOS VALORES DE EMISSIVIDADE [12].	15
FIGURA 15 - UTILIZAÇÃO DO ACP PARA MELHORAR A QUALIDADE DA ANÁLISE FEITA A) TERMOGRAMA INICIAL; B) TERMOGRAMA APÓS PROCESSAMENTO UTILIZANDO O ACP [30].	17
FIGURA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE: A) MÉTODO DE RATIO E EVAPORAÇÃO (RE); E B) O MÉTODO DO ÍNDICE TÉRMICO DE EVAPORAÇÃO [30].	18
FIGURA 17 – MÉTODO DE ANÁLISE DE SUBTRAÇÃO DE IMAGENS FAZENDO: A) A DIFERENÇA ENTRE O TERMOGRAMA PARA UM DADO TEMPO E UM TERMOGRAMA DE REFERÊNCIA; B) A DIFERENÇA ENTRE O TERMOGRAMA OBTIDO E O ANTERIOR [22].	18
FIGURA 18 - PRESENÇA DE ÁGUA NO TERMOGRAMA AINDA INVISÍVEL AO OLHO NU [34].	20
FIGURA 19 - AZULEJOS COM INDÍCIOS DE DELAMINAÇÃO EM QUE: VERMELHO) NÃO HÁ ALTERAÇÃO SIGNIFICATIVA DA TEMPERATURA; AZUL) DIMINUIÇÃO DE TEMPERATURA [53].	22
FIGURA 20 - ANÁLISE DE UM AUMENTO DE TEMPERATURA NUM DESTACAMENTO EM RELAÇÃO À ZONA CORRENTE [10].	23
FIGURA 21 - MANIFESTAÇÃO DE PONTE TÉRMICA NUM TERMOGRAMA [34].	24
FIGURA 22 - MANIFESTAÇÃO TERMOGRÁFICA DE ISOLAMENTO MAL APLICADO [35].	25
FIGURA 23 – ÁREA SEM ISOLAMENTO TÉRMICO [57].	26
FIGURA 24 - INFILTRAÇÃO DE AR POR UMA COM CAIXILHARIA INCORRETAMENTE ISOLADA [17, 35].	27
FIGURA 25 - FISSURAS PROVOCADAS NA CHAMINÉ DEVIDO À EXPANSÃO TÉRMICA.	28
FIGURA 26 - DIMINUIÇÃO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL PROVOCADO POR SISTEMA AVAC [35].	29
FIGURA 27 - TERMOGRAMAS DE SAÍDAS DE AR EM QUE: A) MÁ DISTRIBUIÇÃO DO FORNECIMENTO DE AR; B) APRESENTA O CORRETO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA [16].	29
FIGURA 28 - SISTEMA DE AR HORIZONTAL COM INCORRETA DISTRIBUIÇÃO DE AR [60].	30
FIGURA 29 - TERMOGRAMA DE: A) TUBOS DE LIGAÇÃO DO FLUIDO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO; B) PAVIMENTO RADIANTE [6, 16].	31
FIGURA 30 – A) VARIAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA REFLETIDA E DA EMISSIVIDADE; B) VARIAÇÃO DO VALOR DE U EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA REFLETIDA E DA EMISSIVIDADE [63].	34

FIGURA 31 – A) ESTRUTURA ESCONDIDA COM FUNÇÃO DE SUPORTAR O FRESCO; B) IMAGEM DA PAREDE ONDE SE ENCONTRA A ESTRUTURA [71].	35
FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO IRREGULAR DA TEMPERATURA PROVOCADO POR USO DE ARGAMASSA INCOMPATÍVEL [68].	37
FIGURA 33 – EQUIPAMENTOS NORMALMENTE UTILIZADOS PARA INSPEÇÕES TERMOGRÁFICAS AÉREAS: A) DRONE DJI PHANTOM 2; B) CÂMARA TERMOGRÁFICA FLIR VUE PRO [74, 75].	40
FIGURA 34 - SOBREPOSIÇÃO DE IMAGEM TERMOGRÁFICA EM ARQGIS [77].	42
FIGURA 35 – A) ZONAS DE TEMPERATURA ANÓMALA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS; B) INSPEÇÃO APROXIMADA DE UM PAINEL DEFEITUOSO [82].	43
FIGURA 36 - VOOS REALIZADOS PARA A INSPEÇÃO DE POLUENTES UTILIZANDO A TERMOGRAFIA [83].	44
FIGURA 37 – COMPARAÇÃO ENTRE O PERCURSO PLANEADO A SER REALIZADO (LINHAS RETILÍNEAS) E O PERCURSO REALIZADO (LINHAS ONDULADAS) [86].	45
FIGURA 38 – TRAJETOS ACONSELHÁVEIS A REALIZAR DURANTE UMA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA A UM EDIFÍCIO COM AUXÍLIO DE UAV [89].	46
FIGURA 39 – A) PROCESSAMENTO DE IMAGENS 2D; B) REPRESENTAÇÃO 3D FINAL DOS TERMOGRAMAS [88].	48
FIGURA 40 - NÍVEIS BIM E CRESCENTE COMPLEXIDADE	49
FIGURA 41 - EXEMPLO DE OBTENÇÃO DE NUVEM DE PONTOS ATRAVÉS DE EQUIPAMENTO LASER SCANNER [94].	50
FIGURA 42 – A) METODOLOGIA UTILIZADA PARA FUSÃO DE IMAGEM; B) MODELO BIM FINAL COM TEXTURAS [96].	51
FIGURA 43 - TERMOGRAMAS OBTIDOS AO LONGO DO DIA DE FORMA A CRIAR MODELO BIM 4D [33].	53
FIGURA 44 – EXEMPLO DE ESCALA DE CORES ASSOCIADA A CADA TEMPERATURA UTILIZADA PELO <i>PLUG-IN GRASSHOPPER</i> [33].	53
FIGURA 45 - HEAD MOUNTED DISPLAY QUE PERMITE O USO DE TELEMÓVEL PARA VISUALIZAR REALIDADE VIRTUAL [103].	54
FIGURA 46 - MODELO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL REALIZADO NAS AULAS DE INFORMÁTICA DE CONSTRUÇÃO	55
FIGURA 47 - PRIMEIRA UTILIZAÇÃO DE REALIDADE AUMENTADA [105].	55
FIGURA 48 - A) VISUALIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO EM REALIDADE AUMENTADA; B) POSICIONAMENTO DE REDE <i>SPRINKLERS</i> EM REALIDADE AUMENTADA [107].	56
FIGURA 49 – A) MODELO GERADO COM A NUVEM DE PONTOS DA IMAGEM TÉRMICA E DIGITAL; B) NUVEM DE PONTOS DIGITAL; C) NUVEM DE PONTOS TÉRMICA; D) MODELO CFD; E) FRONTEIRAS DO MODELO; F) MALHA DO MODELO; G) SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO; H) VISTA DE IMAGEM TÉRMICA NO INTERIOR DO MODELO; I) VISTA DE IMAGEM DIGITAL NO INTERIOR DO MODELO [111].	58
FIGURA 50 – VISÃO GERAL DA METODOLOGIA PROPOSTA.	62
FIGURA 51 – PARÂMETROS E PROPRIEDADES NECESSÁRIAS PARA CARACTERIZAR O MODELO BIM E REALIZAR A SIMULAÇÃO DO MODELO TÉRMICO E ENERGÉTICO.	63
FIGURA 52 – CONDIÇÕES E PASSOS A SEREM REALIZADOS NAS INSPEÇÕES DURANTE A FASE DE EXECUÇÃO.	65
FIGURA 53 – PROCEDIMENTOS A SEREM REALIZADOS DE FORMA A FAZER UMA SIMULAÇÃO TÉRMICA E ENERGÉTICA REALISTA DO EDIFÍCIO.	68
FIGURA 54 – PROCESSO DE INSPEÇÃO DURANTE A FASE DE UTILIZAÇÃO.	70
FIGURA 55 – PROCEDIMENTOS A SEREM REALIZADOS APÓS A DETECÇÃO DE UMA ANOMALIA.	71

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Φ – Fluxo de Calor [-]

α – Coeficiente de absorção [-]

ρ – Coeficiente de reflexão [-]

τ – Coeficiente de transmissão [-]

c – Velocidade da luz [$m \cdot s^{-1}$]

k – Constante de Boltzmann [$J \cdot K^{-1}$];

λ – Comprimento de onda (μm)

T – Temperatura absoluta (K)

h – Constante de Plank [Js]

σ – Constante de Stefan-Boltzmann [$W/m^2 \cdot K^{-4}$]

ε – Emissividade [-]

U – Coeficiente de transmissão térmica [$W/m^2 \cdot K$]

E – Poder emissivo [$W \cdot m^{-2}$]

$E_{\lambda T}$ – Radiância espectral do corpo negro [W / m^3]

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

4D – Quatro Dimensões

ACP – Análise de Componentes Principais

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BIM – Building Information Modelling

CAD – Computer Aided Design

CFD – Computer Fluid Dynamics

EPAR – Energy Performance Augmented Reality

ETICS – External Thermal Insulation Composite System

FIR – Far InfraRed

GCU – Ground Control Unit

GPS – Global Positioning System

HDM – Head Mounted Display

HFM – Heat Flux Meter

ISO – International Organization for Standardization

ITE – Índice Térmico de Evaporação

LS – Laser Scanning
MIR – Medium InfraRed
MR – Mixed Reality
NIR – Near InfraRed
PV – Painéis Fotovoltaicos
RA – Realidade Aumentada
Rs – Resistência Superficial
RV – Realidade Virtual
SfM – Structure from Motion
SST – Sistemas solares Térmicos
TIR – Termografia de InfraVermelhos
UAV – Unmanned Aerial Vehicles
UWB – Ultra Wide Band

1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO DO TEMA

A evolução constante do setor da construção exige soluções inovadoras de inspeção e diagnóstico. Atualmente, o grande objetivo para os edifícios, novos e existentes, é o aumento da sua eficiência energética, de forma a cumprir as metas europeias. No entanto, as anomalias que muitas vezes se apresentam durante a fase de serviço podem comprometer esse propósito. As anomalias que resultam na ineficiência energética dos edifícios podem ser observadas através de variações de temperatura.

A termografia de infravermelhos, ao longo dos anos, tem sido utilizada cada vez mais no setor construtivo, tendo sido comprovada a sua eficácia na deteção de defeitos associados a variações de temperatura. Esta permite captar a intensidade da radiação infravermelha e convertê-la numa imagem com uma escala de cores associada à temperatura. A imagem resultante é denominada de termograma.

A grande vantagem do uso da termografia no setor construtivo é o facto de ser um método não destrutivo e não invasivo. Assim, é possível localizar o local da anomalia e reduzir os custos associados à sua análise. As inspeções termográficas podem ser realizadas de forma passiva ou ativa. Os dados fornecidos pelos termogramas podem ser analisados de duas formas. A primeira, a análise qualitativa, que se caracteriza por ser uma análise mais simples. A segunda, a análise quantitativa, é um tipo de análise mais complexa e que requer um elevado grau de rigor.

Os avanços tecnológicos ao longo dos anos permitiram reduzir os custos de produção de equipamentos, possibilitando a redução dos preços de venda. Graças a isto, foi possível testar a aplicabilidade de novos métodos de trabalhos com o auxílio de equipamentos inovadores como, por exemplo, drones. Um dos avanços tecnológicos mais notáveis observou-se nas câmaras termográficas. A redução do seu tamanho, aumento de qualidade de imagem e aumento do número de pontos em que é observável a temperatura, permitem análises mais detalhadas e eficazes, que suportam a integração dos seus resultados em novas metodologias, como o *Building Information Modeling* (BIM), Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA).

A junção da termografia de infravermelhos com novos equipamentos como os drones mostra-se promissora para a inspeção e manutenção de edifícios, permitindo realizar ensaios que antes eram impossíveis ou perigosos. Por outro lado, a integração dos seus resultados em novas metodologias, como o BIM, RV e RA, permitirá elevar esta técnica a novos patamares, tornando-a ainda mais útil como técnica de inspeção e diagnóstico.

1.2. INTERESSES E OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta dissertação foi realizada com o intuito de perceber melhor as diversas utilizações da termografia de infravermelhos no setor construtivo e quais as vantagens que são possíveis de obter ao realizar a fusão desta com novas tecnologias / metodologias de modelação de edifícios. Pretendeu-se também, com base numa revisão da literatura detalhada e alargada, propor uma metodologia, com base na fusão da termografia com novas tecnologias, direcionada para novas edificações de forma a garantir a qualidade das mesmas durante a sua fase de execução e utilização.

Para a realização deste trabalho foram definidos os seguintes objetivos parciais:

- Revisão da literatura referente aos princípios físicos da transferência de calor, aos parâmetros que podem influenciar os resultados e aos métodos de análise dos resultados;
- Revisão da literatura referente à aplicação da termografia para a deteção de anomalias existentes em edifícios, quer habitacionais quer históricos, e para a determinação do coeficiente de transmissão térmica de elementos construtivos;
- Revisão de literatura referente à aplicação da termografia associada a novas tecnologias. Entre as várias tecnologias, analisaram-se os drones, modelos BIM, Realidade Virtual e Realidade Aumentada;
- Proposta de metodologia direcionada para novas edificações.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A atual dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, cujo seu conteúdo consiste em:

- No capítulo 1 é feita uma introdução do tema abordado, as motivações e os principais objetivos a serem alcançados;
- No capítulo 2 são descritos os princípios físicos da termografia de infravermelhos, as condições e parâmetros que influenciam a obtenção de resultados, as diferenças entre a termografia ativa e termografia passiva e, por último, a explicação da análise qualitativa e alguns métodos de análise quantitativos.
- No capítulo 3 são apresentados alguns dos defeitos observáveis através da termografia de infravermelhos, que ocorrem usualmente em edifícios habitacionais e também em edifícios históricos. É mencionado como pode ser calculado utilizando a termografia o valor do coeficiente de transmissão térmica, parâmetro fundamental para avaliação energética.
- O capítulo 4 aborda algumas das novas tecnologias que podem ser utilizadas em conjunto com a termografia, sendo feita uma pequena introdução de cada uma delas, os detalhes mais importantes e algumas vantagens e desvantagens. São também expostos vários exemplos da utilização atual da termografia em cada uma das tecnologias em diferentes setores de atividade.
- No capítulo 5, é proposta uma metodologia destinada a acompanhar as fases de execução e de utilização dos edifícios, garantindo a qualidade dos trabalhos realizados.
- Por último, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões desta dissertação e são referidas considerações que podem contribuir para futuros trabalhos.

2

FUNCIONAMENTO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

2.1. PRINCÍPIOS FÍSICOS

A radiação infravermelha foi descoberta pelo físico William Herschel no ano 1800 aquando da descoberta da existência de energia térmica fora do espectro visível. Na verdade, o que se denomina por radiação visível é apenas uma pequena parte do espectro eletromagnético. O espectro eletromagnético engloba vários comprimentos de onda, desde pequenos, como os raios gama, a grandes comprimentos, como ondas de rádio, tal como se pode ver na Figura 1. Herschel observou as diferentes temperaturas provocadas pelos vários comprimentos de onda da radiação solar. A energia proveniente do sol foi captada por recipientes próprios que continham um prisma para filtrar vários tipos de radiação e termómetros que indicavam a sua temperatura. O que William Herschel observou foi que a temperatura medida nos termómetros dentro dos recipientes era maior que a temperatura ambiente. Com isto, Herschel concluiu que, quanto mais para lá da gama do vermelho, maiores as temperaturas obtidas em relação ao espectro visível. A experiência provou que a radiação proveniente do sol tem um espectro maior do que a do espectro visível [1]. Mais tarde, outros cientistas mostraram que a radiação infravermelha, tal como a visível, está sujeita à reflexão, absorção e refração.

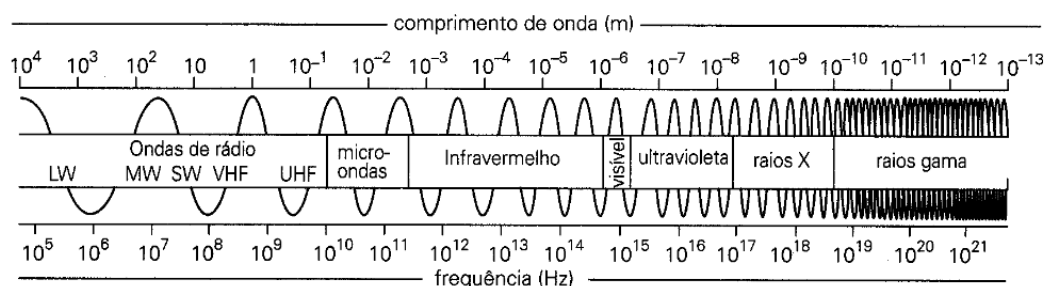


Figura 1 - Espectro eletromagnético [2].

A radiação infravermelha estende-se dos 0.7 até aos 1000 μm [2, 3]. Dentro deste intervalo, pode subdividir-se em radiação infravermelha curta (NIR, de 0.7 até 3.0), intermédia (MIR, 3.0 até 6.0), longa (FIR, de 6.0 até 15.0) e, por último, a muito longa (de 15.0 até aos 1000 μm). Esta radiação invisível é

captada pelas câmaras de infravermelhos e convertida para uma escala de temperatura [1, 3, 4]. Normalmente, as câmaras de infravermelhos são sensíveis à radiação intermédia (MIR) e à longa (FIR). No entanto, com a melhoria da tecnologia, o uso de FIR é cada vez mais popular em câmaras comerciais.

Para temperaturas maiores que os 0 K, considerado o zero absoluto da temperatura, todos os corpos emitem radiação térmica. A intensidade da radiação emitida pelo corpo depende de dois fatores - do comprimento de onda e da temperatura. À medida que a temperatura aumenta, a quantidade de energia emitida em cada comprimento de onda aumenta.

Ao incidir um fluxo de calor Φ na superfície de um corpo, uma parte deste é absorvida (Φ_A), outra é refletida (Φ_R) e a última parte é transmitida através do corpo (Φ_{TT}). Sendo assim, é possível definir três coeficientes: o coeficiente de absorção α ; coeficiente de reflexão ρ ; e o coeficiente de transmissão τ [5]. Estes coeficientes podem ser definidos por rácios que são:

$$\alpha = \frac{\Phi_A}{\Phi}, \quad \rho = \frac{\Phi_R}{\Phi}, \quad \tau = \frac{\Phi_{TT}}{\Phi}. \quad (1)$$

A soma dos três coeficientes definidos tem o valor total de 1, logo, pode chegar-se à seguinte igualdade, denominado por lei de Kirchhoff, utilizável para qualquer corpo:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2)$$

Tendo em conta estes três parâmetros, surge o conceito do corpo negro, sendo que este tem um papel fundamental nas medições da termografia de infravermelhos. Na realidade, não existe um corpo negro perfeito, visto que nenhum objeto consegue ter absorção e emissão perfeitas. No entanto, perceber o seu funcionamento faz toda a diferença para entender como a termografia é executada. O corpo negro é um corpo que, teoricamente, é capaz de absorver toda a radiação que incide sobre ele, seja qual for o seu comprimento de onda [3, 6]. Assim, sendo o corpo negro o absorvedor perfeito, os coeficientes referidos anteriormente podem exprimir o seu comportamento da seguinte forma:

$$\alpha = 1, \quad \rho = 0, \quad \tau = 0 \quad (3)$$

Segundo Gustav Robert Kirchhoff, se um corpo negro se encontrar em equilíbrio termodinâmico, este emite a radiação ao mesmo ritmo que a absorve. A radiação que é emitida por um corpo negro pode ser descrita por três expressões, que se traduzem em três leis:

- **Lei de Planck**

Max Planck desenvolveu uma fórmula que quantifica a radiação emitida por um corpo negro, denominada por Lei de Planck [3]:

$$E_{\lambda T} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5}}{\exp(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}) - 1} \quad [\text{W} / \text{m}^3] \quad (4)$$

Em que:

$E_{\lambda T}$ – Radiância espectral do corpo negro a uma dada temperatura T (K) e comprimento de onda λ (μm);

c – Velocidade da luz = 3.0×10^8 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];

h – Constante de Plank = 6.63×10^{-34} [Js];

k – Constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$];

T – Temperatura absoluta do corpo (K);

λ - Comprimento de onda (μm).

Esta fórmula, quando traduzida graficamente, representa um conjunto de curvas para várias temperaturas. Este gráfico traduz a radiância espectral de um corpo negro em função do comprimento de onda e da temperatura (Figura 2). Como é observável, quanto maior a temperatura, menor o comprimento de onda onde ocorre o máximo. Para comprimentos de onda muito longa, a radiância aproxima-se de zero. Na figura encontram-se, também, descritos os intervalos de comprimento de onda que são utilizados pelas câmaras de infravermelhos.

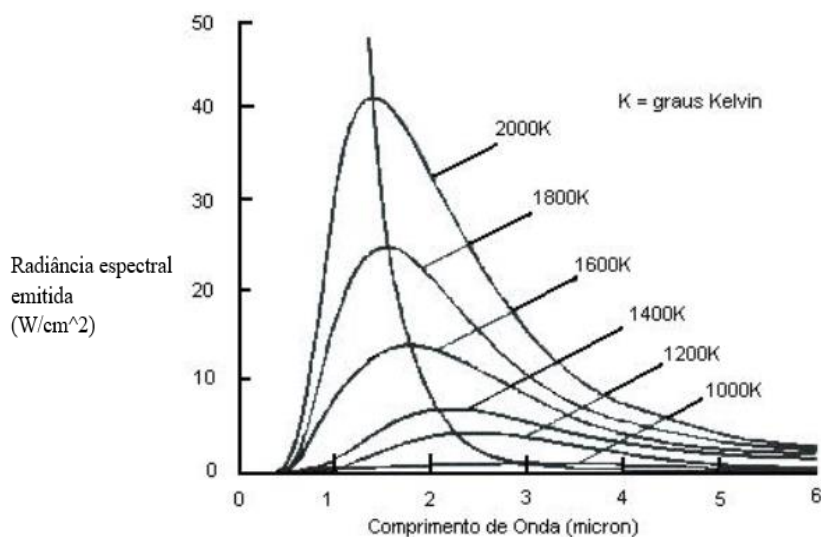


Figura 2 - Radiância espectral de um corpo negro segundo a lei de Plank para uma dada temperatura, em função do comprimento de onda [7].

▪ **Lei de Wien**

Derivando a fórmula de Planck em relação ao comprimento de onda, é possível obter a Lei de Wien. Através desta lei, é possível saber qual o comprimento de onda que corresponde à radiância máxima, para uma dada temperatura. Esta relação é obtida através da fórmula:

$$\lambda = 2898T^{-1} \quad (5)$$

Em que:

λ – Comprimento de onda (μm);

T – Temperatura (K).

Pode concluir-se, analisando a Figura 2 e a equação 5, que, quanto maior a temperatura, menor o comprimento de onda.

▪ **Lei Stefan-Boltzmann**

A lei de Stefan-Boltzmann é o integral da Lei de Planck do comprimento de onda de 0 até ao infinito. Assim, podemos obter o valor total do poder emissivo do corpo negro para uma dada temperatura [3]. Graficamente, o poder emissivo corresponde à área por baixo da curva de Planck para uma dada temperatura. O valor do poder emissivo pode ser obtido pela fórmula:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (6)$$

Em que:

E - Poder emissivo;

T – Temperatura (K);

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$).

As três leis acabadas de referir são de extrema importância para compreender o comportamento de um corpo quando sobre ele incide radiação e como os equipamentos são capazes de captar e interpretar essa radiação, convertendo-a em termogramas que permitem a leitura da temperatura do objeto em análise.

No entanto, nenhum corpo tem o comportamento de um corpo negro. Um corpo não negro apenas absorve uma parte da radiação que nele incide (α), a restante é refletida (ρ) e transmitida (τ).

Para que exista equilíbrio do sistema, segundo a Lei de Kirchhoff, a energia emitida por um corpo tem de ser igual à energia que é absorvida por ele. O parâmetro que caracteriza a energia emitida por um corpo é a emissividade (ϵ). Podemos então afirmar que $\alpha = \epsilon$. A emissividade está relacionada com a temperatura, o comprimento de onda e a direção da radiação. O valor da emissividade varia entre 0 e 1

e representa a fração da energia que um corpo real emite em relação à que um corpo negro à mesma temperatura emitiria [3, 6].

Em inspeções termográficas de edifícios, quase todas as superfícies em análise têm comportamento de um corpo não negro e a maior parte são opacas para a radiação infravermelha. Por isso, a relação acima pode ser simplificada para:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (7)$$

Segundo a lei de Kirchhoff, a equação 7 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (8)$$

Existem corpos não negros que são conhecidos como corpos cinzentos. Estes corpos são assim denominados pois o seu valor de emissividade (ε) é independente do comprimento de onda (λ). Para estes corpos, o fluxo de energia pela fórmula de Stefan-Boltzmann é escrito da seguinte forma:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (9)$$

2.2. CONDIÇÕES E PARÂMETROS QUE CONDICIONAM AS INSPEÇÕES TERMOGRÁFICAS

Ao utilizar a termografia de infravermelhos para analisar um elemento ou um material, é necessário ter em conta vários parâmetros que influenciam a qualidade e a precisão dos termogramas que irão ser obtidos. Como foi possível observar no capítulo anterior, os princípios da termografia são baseados nas trocas de calor dos materiais, por isso, é expectável que a leitura dos termogramas seja altamente dependente das características dos mesmos e também dos fatores climáticos. Algumas destas características e fatores que influenciam a termografia são:

-Emissividade

A emissividade (ε) é um parâmetro que depende exclusivamente da superfície do material. É fundamental determinar corretamente este parâmetro para ter a informação correta nos termogramas, visto que, caso se utilize o valor errado, obter-se-á um resultado também errado da temperatura superficial do objeto [8]. A emissividade corresponde, assim, à capacidade do elemento em estudo emitir energia, descrevendo assim, a relação entre a radiação emitida e a temperatura do material.. O valor da emissividade pode variar entre 0 (corpo refletor perfeito) e 1 (corpo negro perfeito) [8-10]. No caso de um corpo com emissividade 0, é possível de realizar a inspeção termográfica pintando de preto a zona que se pretende investigar [8]. O ângulo da câmara termográfica em relação ao elemento é um fator que altera o valor da emissividade. Por exemplo, para materiais não-metálicos, para ângulos superiores a 70°, o valor da emissividade decai rapidamente para zero. No caso dos metais observa-se o oposto. Entre os 0° e os 40°, o valor de emissividade é muito baixo [3].

Avdelidis e A. Moropoulou [8] realizaram um estudo onde tinham como objetivo determinar se o comprimento de onda (médio e longo) influenciava a emissividade dos materiais de construção utilizados. Para isso, realizaram vários ensaios de medição de emissividade para diferentes comprimentos de onda e para várias temperaturas diferentes (0°C, 48,8°C e 100°C). Concluíram, então, que a emissividade de um material varia, quer com a temperatura, quer com o comprimento de onda definidos. Frisaram, também, a importância de utilizar o valor correto da emissividade nas propriedades da câmara se o objetivo for o de obter a temperatura real. Para comprovar a importância da emissividade foram captados dois termogramas consecutivos com valores de emissividade completamente diferentes. Como se pode observar na Figura 3, a alteração da emissividade muda drasticamente o valor da temperatura superficial obtido.

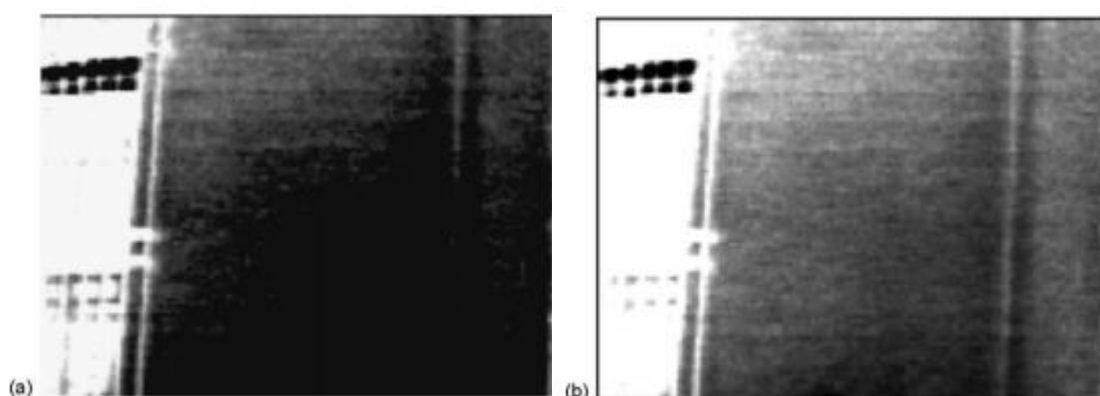


Figura 3 - a) termograma com valor aleatório de emissividade; b) termograma com valor correto de emissividade [8].

-Posicionamento da câmara

A distância entre a câmara e o elemento em estudo é, também, um fator importante a ter em conta. No caso da distância entre os dois for superior a 10 metros, a radiação térmica é atenuada [10, 11]. É, também, aconselhável nunca ter a câmara perpendicular à superfície analisada. Isto deve-se ao facto de o ângulo da câmara ao elemento influenciar o valor da emissividade que, por sua vez, irá alterar o valor da temperatura superficial registada. Na Figura 4 pode ver-se a influência do ângulo nos valores de emissividade para alguns materiais não-metálicos.

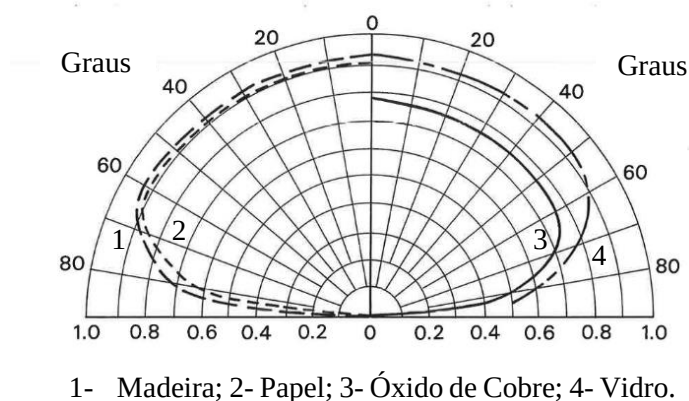


Figura 4 – Influência do ângulo no valor de emissividade para alguns não-metais [3].

-Cor da superfície

A cor da superfície pode mascarar ou realçar defeitos existentes na fachada. Isto acontece devido ao facto de cada cor ter diferentes valores de absorção de radiação solar [10, 12]. Um exemplo da influência da cor na termografia foi observada no trabalho desenvolvido por Barreira e Freitas [12]. Neste estudo, os azulejos são de cor branca e vários tons de azul, fazendo parte da fachada da Igreja do Carmo, no Porto. Durante o dia, é possível ver a grande discrepância de valores de temperatura superficial provocada pelos tons mais escuros dos azulejos, sendo até possível observar o padrão dos mesmos. Ao anoitecer, os valores são mais homogêneos e contínuos, sendo a influência da cor menos importante (Figura 5).

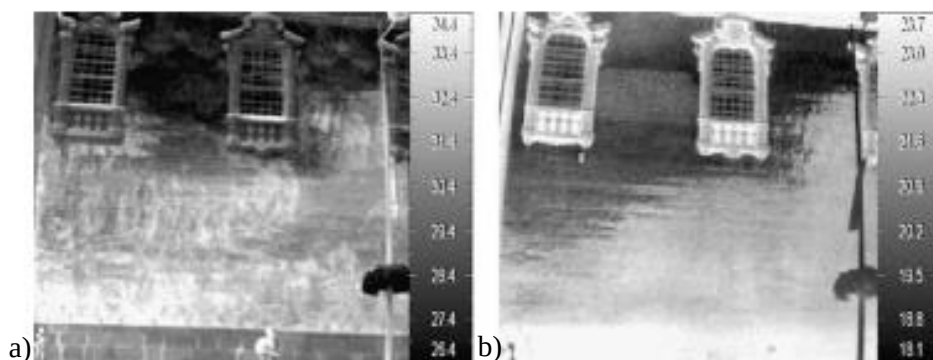


Figura 5 - Termograma captado durante: a) dia; b) noite [12].

Lourenço et al [13], testaram o efeito da cor em dois tipos de anomalias em azulejos - descolamentos e humidade. Foram testadas duas paredes, uma com azulejos pretos e outra com azulejos brancos. Tal como expectável, devido à absorção da cor, a temperatura superficial dos azulejos pretos era muito maior do que a dos outros utilizados. Neste caso, a cor preta conseguiu realçar melhor as anomalias porque o diferencial de temperatura foi maior.

Outro exemplo pode ser observado em [14]. Ao utilizar a termografia na fachada de um edifício, é possível ver claramente a influência das cores na temperatura superficial. Nos locais com cores mais escuras, a temperatura é consideravelmente maior (Figura 6). Num edifício diferente do primeiramente analisado, a cor não teve influência na variação da temperatura (Figura 7). No entanto, isto pode ser explicado através das mudanças do padrão de cor, pois estes ocorreram numa área menor e, portanto, as diferenças na absorção solar não geraram variações de temperatura.

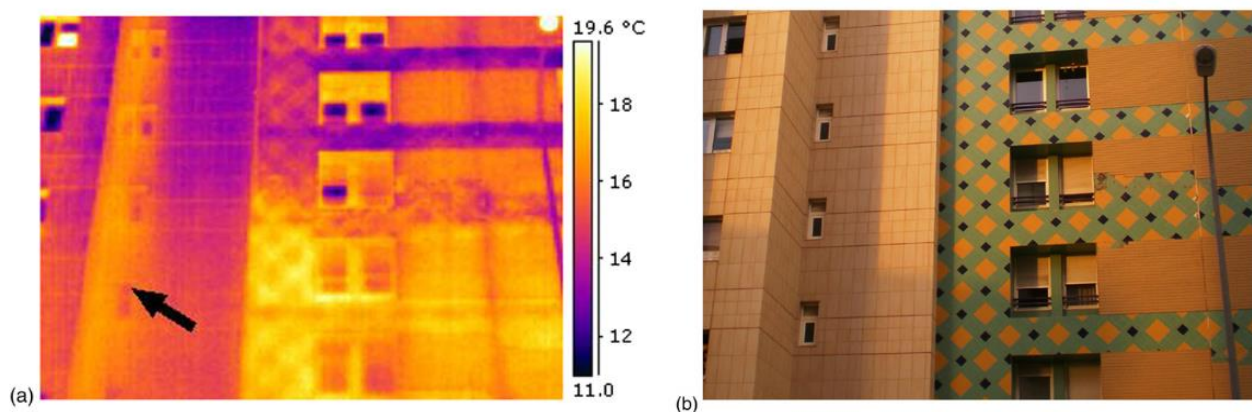


Figura 6 - Influência de padrões escuros de grandes dimensões na temperatura superficial [14].

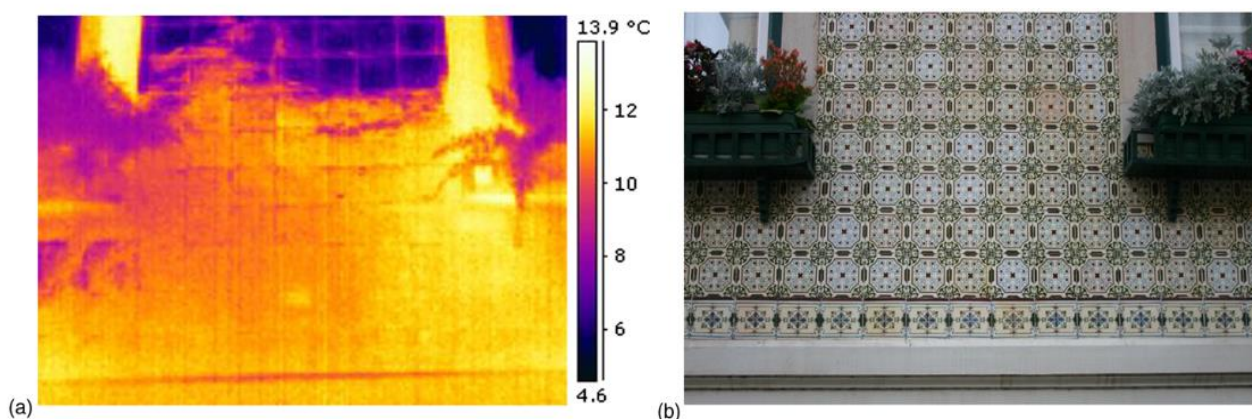


Figura 7 - Influência de padrões escuros de pequenas dimensões nos termogramas [14].

-Reflexões

Materiais metálicos ou envidraçados podem influenciar os resultados devido à grande diferença de emissividade em relação aos restantes materiais utilizados na construção. Pode, também, acontecer que, por consequência dos materiais serem muito refletivos, ocorram reflexões que influenciam os termogramas. O efeito das reflexões pode ser observado no trabalho realizado por Edis et al [14]. Neste trabalho, observaram-se discrepâncias nas imagens obtidas. O revestimento utilizado no edifício é um cerâmico vidrado e, sendo este altamente refletivo, transmitiu a radiação proveniente de outro edifício, aumentando a temperatura nessa zona (Figura 8).

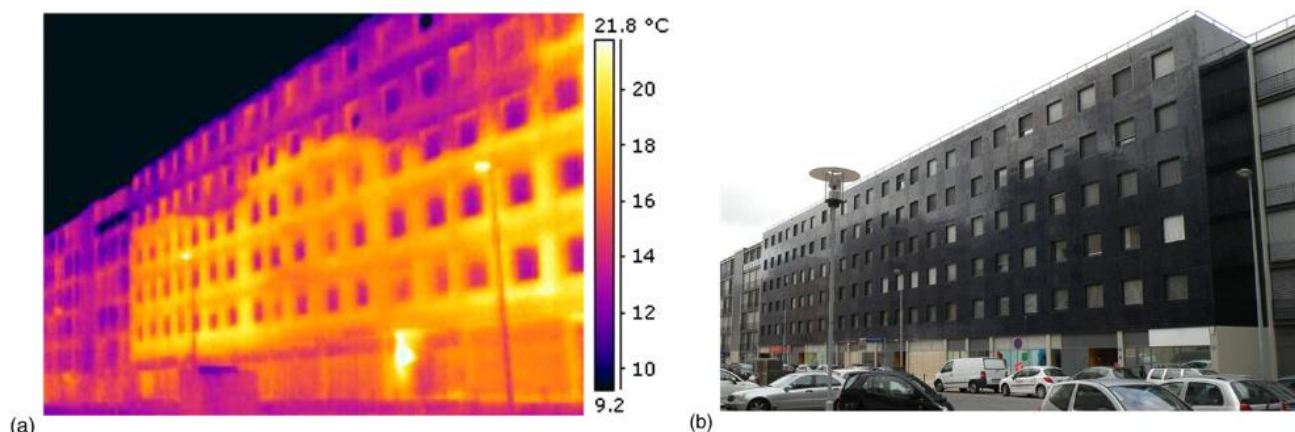


Figura 8 - Termograma influenciado por reflexão de temperatura [14].

Um objeto com baixa emissividade induz um aumento da temperatura superficial medida pela câmara termográfica devido à reflexão térmica. Barreira e Freitas [12] observaram este efeito através dos termogramas, sendo possível ver-se um aumento de temperatura devido à reflexão feita pelos cerâmicos utilizados no chão (Figura 9).

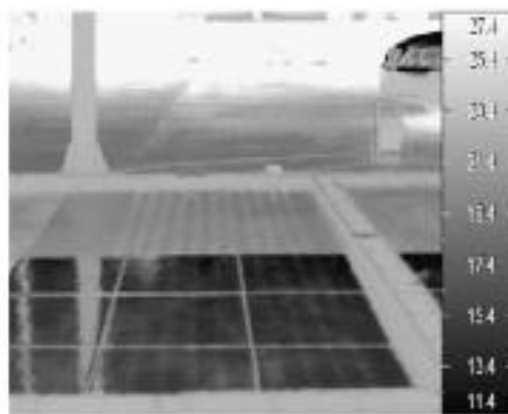


Figura 9 - Efeito da refletividade em azulejos cerâmicos [12].

-Elementos da envolvente

É necessário ter em conta os elementos da envolvente. Estes podem causar sombreamentos ou, então, refletir radiação para o elemento em estudo, causando zonas de aquecimento que não correspondem a anomalias. Tal pode ser observado no trabalho realizado por Edis et al, [14]. A análise individual dos termogramas pode levar à conclusão que existe alguma anomalia na parede assinalada. Contudo, analisando as fotografias digitais, é possível ver que a zona com temperatura superficial anómala é

provocada pelo sombreamento das varandas (Figura 10). Isto mostra que as obtenções de fotografias da zona analisada são de extrema importância de forma completar os termogramas.

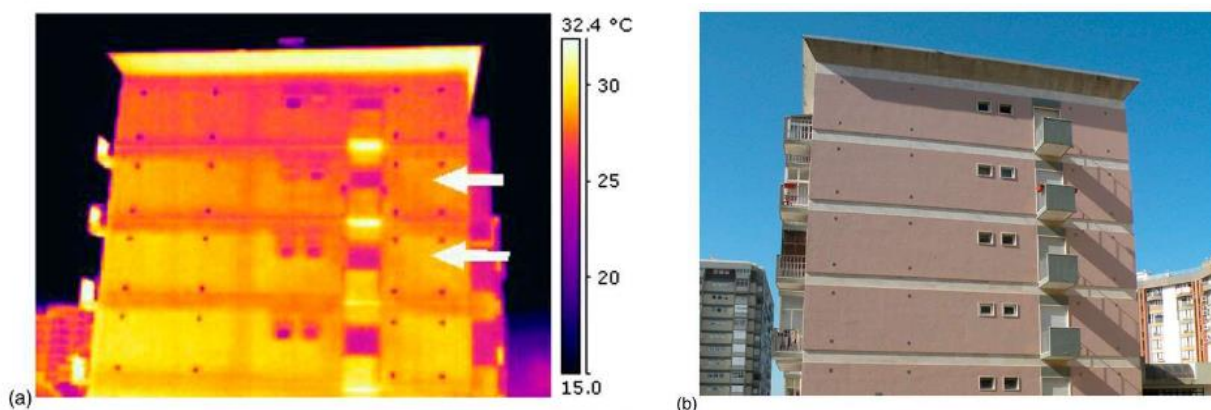


Figura 10 - Influencia do sombreamento em termogramas [14].

-Condições Meteorológicas

As condições meteorológicas têm um grande impacto na captação de termogramas. Fatores como a velocidade do vento, temperatura do ar, precipitação e sombreamento provocado pelas nuvens, provocam irregularidades na leitura dos termogramas [15]. É por motivos como estes que é aconselhável uma distância da câmara inferior a 10 metros. Não é aconselhável fazer leituras termográficas em dias demasiado ventosos pois o vento reduz a resistência térmica superficial e arrefece a superfície [6, 16]. O valor da resistência superficial (R_s) é muito influenciado pela velocidade do vento [17] mas, para valores muito altos da velocidade do vento, a resistência superficial é considerada desprezável. Contudo, em dias de céu limpo e temperaturas baixas, poderá haver uma diferença de temperatura entre a superfície do elemento e o ar, devido à transferência de calor radiante.

2.3. TERMOGRAFIA ATIVA E TERMOGRAFIA PASSIVA

Na análise termográfica, os elementos podem ser estudados de duas formas: através da termografia passiva ou da termografia ativa. As duas técnicas permitem analisar de forma diferente o comportamento térmico do elemento em causa.

Na termografia passiva, a análise do elemento é feita sem qualquer tipo de influência calorífica artificial, podendo até nem ser necessária nenhuma fonte de calor para evidenciar a anomalia.. Por este motivo, a incidência solar sobre o caso em estudo é considerada como uma fonte natural de aquecimento e, por isso, também é utilizada no método passivo. Devido a ser um método mais simples, a análise dos termogramas normalmente feita de forma qualitativa, contudo também pode realizar-se uma análise quantitativa.

Em contrapartida, na termografia ativa recorre-se a uma fonte artificial que induz um diferencial de temperatura na zona em estudo. A fonte de calor pode ser, por exemplo, uma lâmpada de halogéneo, uma pistola de calor ou um forno. O diferencial de temperatura pode ser realizado através de transmissão ou de reflexão [18]. O método da transmissão consiste em colocar uma fonte de calor atrás do elemento

em estudo (do lado oposto de onde se encontra a câmara termográfica) e analisar a transferência de calor através do fenómeno da condução. Este tipo de método é utilizado para realizar análises em profundidade de anomalias [13]. O segundo método – o método da reflexão – consiste em colocar uma fonte de calor do mesmo lado onde se encontra a câmara termográfica (Figura 11). É necessário ter cuidado de forma a que a fonte não provoque reflexões, influenciando assim os termogramas. Este método é normalmente utilizado para se realizar análises superficiais dos defeitos [13]. Apenas realizando uma análise quantitativa da informação térmica da anomalia, é possível perceber a sua profundidade, tamanho e propriedades físicas [19].

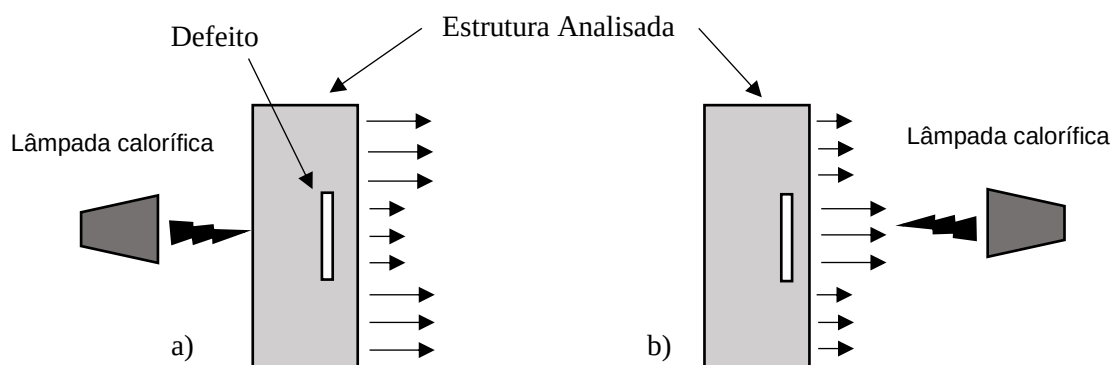


Figura 11 - a) método da transmissão; b) método refletivo. (Adaptado de [18]).

A termografia ativa é difícil de ser utilizada “in situ” devido à utilização da fonte artificial de calor/frio, por isso, a sua utilização é ideal em laboratório. Normalmente, este método é utilizado para fazer estudos quantitativos das superfícies pois é possível replicar as condições entre os ensaios. Existem várias formas de análises termográficas ativas que podem ser realizadas (Figura 12), entre elas:

- A termografia por pulsação (Pulse Thermography) é usada através da aplicação de uma pequena pulsação de energia para o objeto em estudo. Normalmente, é utilizada na inspeção de componentes de paredes finas ou camadas finas [19, 20].
- A termografia de transição (Transient Thermography) consiste no mesmo método que a Pulse Thermography, mas neste a energia é aplicada de forma retangular durante um período mais longo.
- A termografia de amplitude moderada (Lock in Thermography) consiste em aplicar uma excitação de energia harmónica de uma forma periódica.
- Referindo, também, a termografia de amplitude moderada por vibração (Lock in Vibro Thermography), onde é aplicado um ultrassom poderoso, estando a fonte de energia acoplada ao elemento em estudo. Neste último método, os defeitos são detetados através do calor gerado a partir do efeito da vibração, enquanto que zonas sem danos não mostram grandes aumentos de temperatura. Assim, os defeitos ficam visíveis com alto contraste. Este modo de excitação calorífica é aplicado para a inspeção de defeitos, fissuras e delaminação [20].
- Outra variante do método referido anteriormente é a termografia por descarga de vibração (Burst Vibro Thermography). Neste regime, a amostra é excitada através de um breve, mas potente, ultrassom de intensidade constante [21].

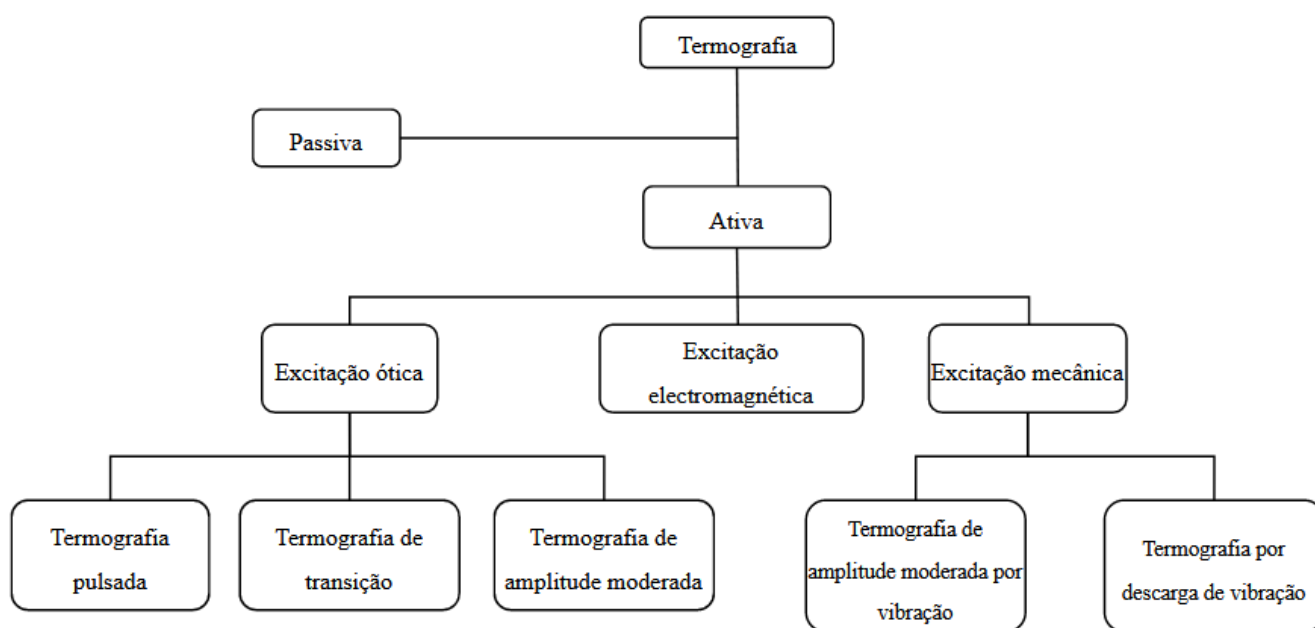


Figura 12 – Estilos de análises termográficas

No trabalho realizado por Lerma et al [22], foram observadas infiltrações de ar através de imagens térmicas a uma folha de cartolina. Foram utilizadas várias diferenças de pressões através de um despressurizador de forma a ver qual o seu efeito. A cartolina foi colocada em duas posições, perpendicular e paralela à roldana da fita da persiana onde existia uma infiltração de ar. Neste último cenário, comparou-se a diferença entre o método ativo e passivo de forma a ver a sua influência nas conclusões do estudo. Foi possível de determinar que, apesar da infiltração de ar ser visível através da abordagem passiva, o contraste entre a zona afetada e a não afetadas é muito mais evidente através da termografia ativa (Figura 13). Além disso, ao expor a cartolina a um diferencial de temperatura, permite atenuar o efeito negativo das condições climáticas exteriores. Esta situação é relevante quando é implementada uma abordagem qualitativa [22].

Quando utilizado o método ativo, também foi possível observar mais facilmente a anomalia para diferenças de pressão mais reduzidas, ou seja, a sensibilidade de deteção da anomalia é maior. Além do referido anteriormente, também é exibida uma maior área de influência da infiltração quando é utilizado este método. Nos casos em que a cartolina se encontra perpendicular ao local da infiltração, apenas se utilizou o método ativo. Através deste estudo, foi também possível concluir que os momentos iniciais do arrefecimento são os mais cruciais, pois é onde se nota as maiores variações de temperatura. Após cerca de 30 segundos, a temperatura estabiliza.

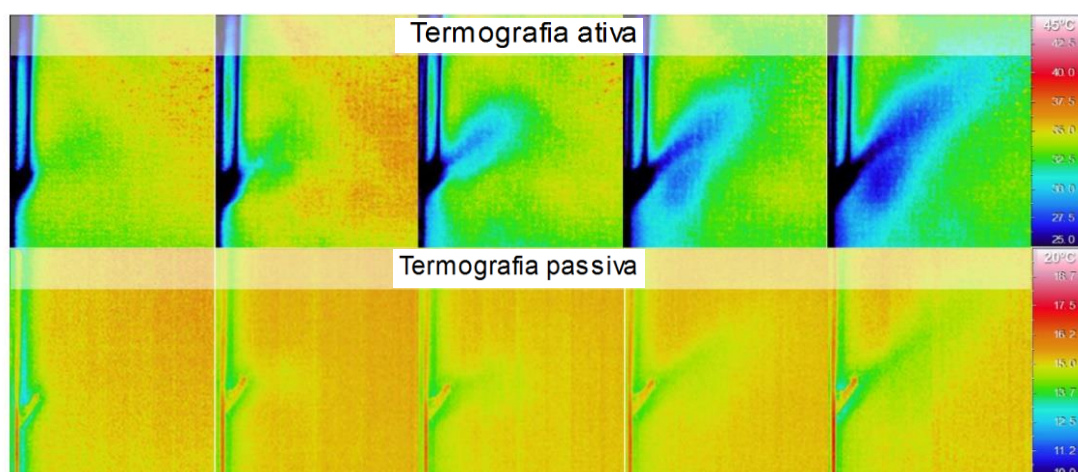


Figura 13 - Comparação entre termogramas obtidos utilizando a termografia ativa e passiva [22].

2.4. MÉTODOS DE ANÁLISE RESULTADOS DOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS

Após serem captados dos termogramas, existem duas formas de processar a informação obtida. As análises que são realizadas podem ser qualitativas ou, então, quantitativas. O tipo de análise a ser feita depende do tipo de anomalia que se está a observar e o nível de detalhe pretendido.

O primeiro tipo de análise, a análise qualitativa, é mais rápida, prática e intuitiva, normalmente utilizada para abordagens superficiais. Não é necessária grande precisão dos valores, pois o único objetivo é observar os padrões térmicos à procura de heterogeneidades. Devido a não ser necessário grande precisão de valores, o valor da emissividade não tem de ser um valor exato, apenas o suficiente para permitir a visualização das anomalias. Por ser de fácil interpretação, a análise pode ser feita “in situ” [6, 13]. A sua utilização é ideal para quando se quer encontrar uma anomalia na zona em estudo.

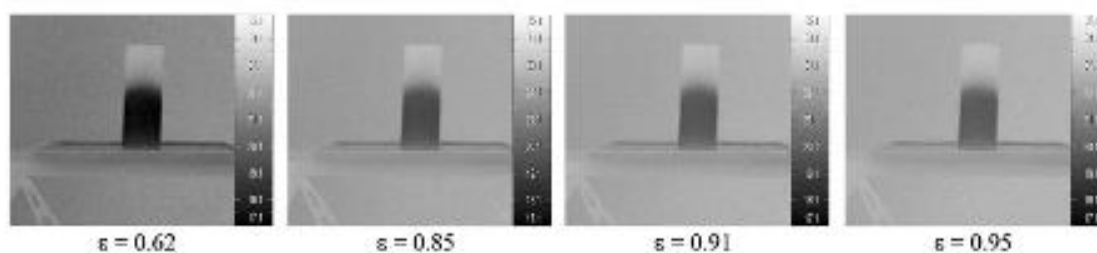


Figura 14 - Termogramas de um provete com a base imersa em água para vários valores de emissividade [12].

Tal como é possível observar na Figura 14, apesar da grande discrepância de valores de emissividade, é perceptível a presença da água num bloco de betão celular autoclavado.

Apesar da análise ser fácil, é aconselhável que o utilizador tenha experiência na utilização da câmara e na interpretação de resultados. É, também, aconselhável utilizar termogramas de referência de zonas que não têm nenhuma anomalia. Assim, se for possível simular as mesmas condições “in situ”, consegue prever-se que tipos de padrões são expectáveis e comparar ambos os termogramas [6].

O segundo tipo de análise é a análise quantitativa, que é mais rigorosa do que a qualitativa. O rigor neste método de análise é necessário pois pretende-se obter temperaturas próximas das reais de forma a realizar análises numéricas dos resultados. Este método requer mais detalhe e é mais utilizado em laboratório, pois é preciso simular as condições de ensaio [13]. Antes do ensaio, é necessário fazer a calibração da câmara de infravermelhos. Por estes motivos, este método é mais demorado. Este tipo de análise quantitativa, tanto pode ser utilizado em laboratório como “in situ”.

Este tipo de análise é mais eficaz do que a análise qualitativa pois permite a medição das temperaturas, sendo até possível na avaliação de destacamentos, arranjar relação entre a carga solar incidente e o contraste térmico entre zonas com e sem defeitos [23]. A utilização da análise quantitativa é ideal para analisar a severidade de anomalias detetadas.

Existem vários tipos de análises quantitativas dos ensaios termográficos que podem ser realizados. Alguns destes tipos de análise são:

-Análise de Componentes Principais

Ao realizar uma inspeção termográfica, pode ser obtido um grande número de termogramas do objeto em estudo. De forma a analisar com mais detalhe uma zona, pode ser realizada uma análise de componentes principais. Ao realizar uma análise ACP, a área de análise é constante ao longo dos termogramas, ou seja, a posição da câmara é fixa. O que muda ao longo destes é o valor de temperatura com o passar do tempo. Por este motivo, cada pixel da sequência termográfica pode ser tratado de forma independente e a intensidade, representa a temperatura [24].

Sendo assim, o grande número de imagens térmicas captadas fornece informação excessiva que se sobrepõe à informação relevante para o objeto em estudo. Este excesso de informação aumenta o tempo de análise e processamento de dados. Através do uso da análise de componentes principais (ACP), é possível reduzir o número de imagens térmicas necessárias de forma a evidenciar as anomalias. Deste modo, a ACP funciona como um “compressor” de imagens.

A ACP é um método estatístico que reduz a dependência de um conjunto de dados composto por variáveis inter-relacionadas, formando novos parâmetros importantes, uma vez que representam as características dos objetos [24, 25]. Isto é possível aplicando uma transformação ortogonal a um conjunto linear de variáveis correlacionadas, noutro conjunto de variáveis ortogonais linearmente não correlacionadas [26]. Este novo conjunto de variáveis permite uma representação compactada da informação original num número muito menor de parâmetros. A concentração de informação nas imagens principais da sequência ACP simplifica a separação de áreas com características diferentes, trabalhando com um menor número de imagens.

De forma a determinar as componentes ACP, é feita uma factorização da matriz de decomposição de valores singulares [24]:

$$A = URV^T \quad (10)$$

Na fórmula acima descrita, A representa uma matriz $m \times n$. R , uma matriz diagonal de ordem $n \times n$, com elementos nulos ou positivos, representando os valores singulares da matriz A . U , é uma matriz $n \times m$ e, V^T , uma matriz transposta $n \times n$ [24, 25, 27-29]. As componentes principais (CP's) são o novo conjunto de variáveis transformadas não correlacionadas. As primeiras componentes principais retêm a maioria

da variação de todas as variáveis originais. Segundo Edis et al [25, 28], das componentes principais obtidas, a primeira componente principal representa o conjunto de propriedades que evoluem regularmente ao longo do tempo. A segunda e terceira componentes principais evoluem de forma desigual ao longo do tempo com pequenas diferenças de temperaturas no decorrer do mesmo. No trabalho realizado pelo autor, foi possível detetar zonas de descolamento de azulejos através do método de ACP. Este método de análise provou ser o mais eficiente em comparação ao ACP ponderado, tendo uma eficácia de 78% a 100%, mantendo a sua consistência em diferentes períodos de tempo e condições ambientais. É, também, relevante de salientar que, quanto menor o intervalo de tempo entre a captura de termogramas, maior a eficácia do método.

Świta, R. e Z. Suszyński [24] tinham como objetivo aplicar a ACP a uma série de termogramas tiradas a um disco de alumínio com vários orifícios de diâmetros e profundidades diferentes. Este disco foi sujeito a uma excitação térmica artificial. Foi possível determinar que, a partir da sequência de termogramas obtidos da ACP, apenas os 3 primeiros continham informação relevante, os restantes possuíam demasiada informação irrelevante que foi considerada ruído pelos autores.

Grinzato et al [30] utilizaram a ACP para análise de termogramas tirados a uma parede húmida. A aplicação do método foi escolhida de forma a que fosse possível separar as diferenças de temperatura devido à evaporação das variações provocadas por fatores ambientais. Os resultados foram bastante positivos, tendo o método permitido detetar uma ponte térmica que não era tão perceptível antes do tratamento matemático (Figura 15). Foi possível concluir que o ACP é um algoritmo simples e eficaz, caso se pretenda analisar altos teores de humidade como, por exemplo, infiltrações provenientes de canalizações.

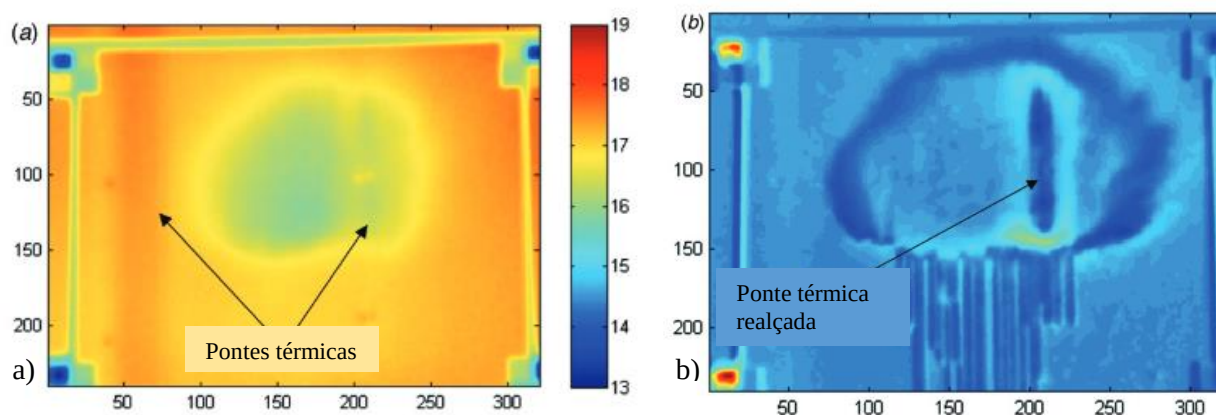


Figura 15 - Utilização do ACP para melhorar a qualidade da análise feita a) termograma inicial; b) termograma após processamento utilizando o ACP [30].

-Análise na base de índices

A análise com base em índices consiste no desenvolvimento de índices que descrevam a anomalia em estudo. Um exemplo deste tipo de análise, destinada à humidade, encontra-se no estudo realizado por Grinzato et al [30]. Normalmente, para a avaliação da humidade em materiais sólidos, utiliza-se o método da perda de massa devido à secagem do material. Em função da perda de massa e do calor que incide no material, é definida uma curva que descreve a secagem do mesmo (Figura 16). É relevante o resultado deste ensaio pois permite definir o teor crítico de humidade, que marca a transição entre a fase seca e saturada. Alternativamente, em vez do método descrito anteriormente, é possível através da

termografia determinar a mesma curva através de um novo parâmetro. Este parâmetro, denominado por índice térmico de evaporação (ITE), expresso pela diferença entre a temperatura da superfície seca e a húmida, dividida pela temperatura seca, permite determinar o rácio de evaporação do material.

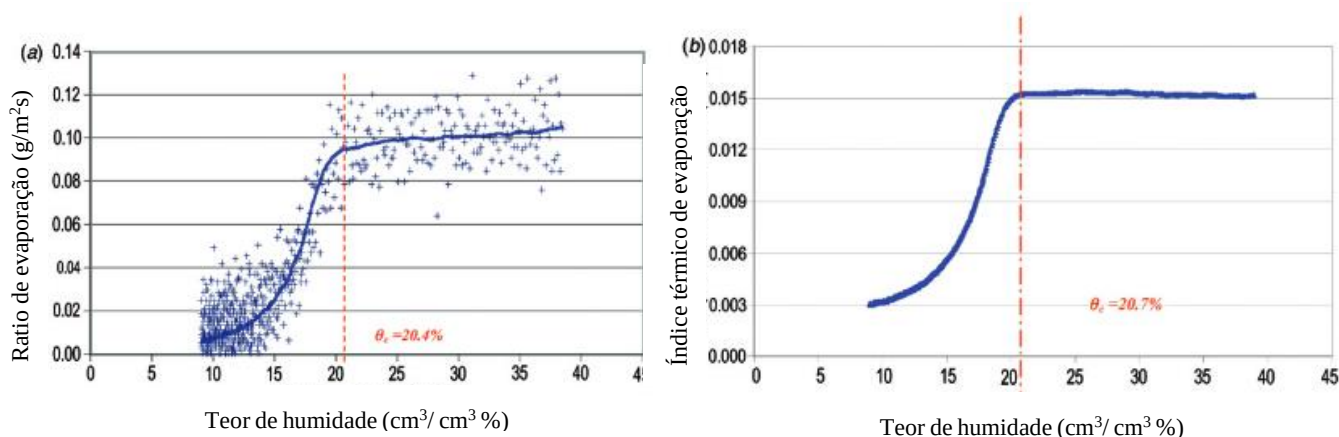


Figura 16 - Comparação entre: a) método de ratio e evaporação (Re); e b) o método do índice térmico de evaporação [30].

-Análise através da subtração de imagens

A análise através da subtração de imagens consiste em fazer a diferença de temperaturas entre termogramas consecutivos, ou então, a um termograma de referência (Figura 17). Lerma et al [22], utilizou este método de análise para o estudo de uma infiltração de ar numa habitação. A análise foi feita das duas formas descritas acima. Graças a este método, foi possível perceber a evolução da temperatura e quais as zonas que mantiveram a sua temperatura e quais as que arrefeceram mais rapidamente. Determinou-se também que os instantes iniciais da fase de arrefecimento são cruciais na análise.

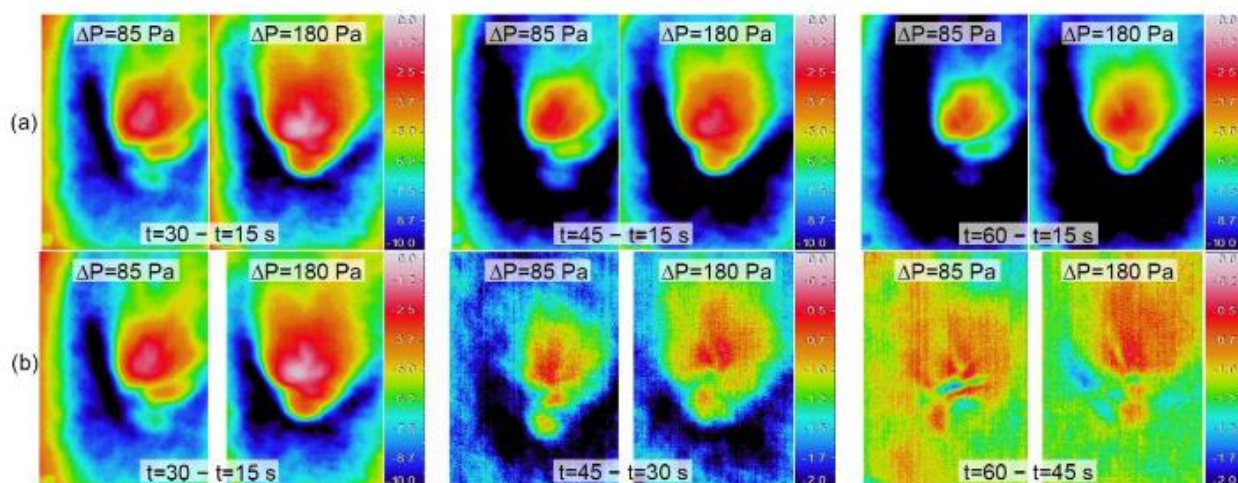


Figura 17 – Método de análise de subtração de imagens fazendo: a) a diferença entre o termograma para um dado tempo e um termograma de referência; b) a diferença entre o termograma obtido e o anterior [22].

3

APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS AOS EDIFÍCIOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A construção é uma área em evolução constante. Com o objetivo de aperfeiçoar a realização de trabalhos e encontrar melhores técnicas de inspeção e análise, procuram-se novos métodos para deteção de anomalias como, por exemplo, a humidade, fissuras, destacamentos, entre outros.

A degradação de elementos construtivos pode causar grandes transtornos aos utilizadores. Estes defeitos podem ter apenas um impacto visual, mas, em casos mais graves, podem causar problemas de saúde para os ocupantes. Um dos problemas mais usuais, e que pode apresentar perigo público, é a queda de revestimentos cerâmicos das fachadas [31].

Grande parte dos ensaios realizados atualmente são de carácter destrutivo, o que torna inconveniente o seu uso, visto que é necessário fazer, posteriormente, a sua reparação. Outro inconveniente destes ensaios é que, normalmente, apenas permitem a análise em linhas ou em pontos, fazendo com que a zona que é observável seja limitada.

Para tentar compensar os pontos fracos dos outros ensaios, surge uma alternativa - a termografia de infravermelhos. Como método, as imagens térmicas contribuem para o diagnóstico da condição dos edifícios, detetar áreas de origem e fugas de calor e medir qual a sua emissão. No entanto, é necessário que o objeto ou elemento analisado tenha um diferencial de temperatura (um ΔT) em relação à temperatura ambiente. Este diferencial pode ser analisado e estudado para chegar a uma avaliação e diagnóstico [32, 33]. As anomalias são detetáveis por diferenças de temperatura nos termogramas em relação à zona corrente sem anomalias. Apesar de não ser possível determinar qual a profundidade de anomalias sem fazer ensaios complexos, os ensaios termográficos podem ser complementados por outros que forneçam mais informação. No entanto, observando os termogramas é muitas vezes possível concluir sobre qual o tipo de anomalia existente.

A termografia de infravermelhos tem como grande vantagem ser um ensaio não destrutivo, que permite obter medições de temperatura sem ter contacto direto com a superfície analisada. É também possível fazer a análise em áreas [12, 34], facilitando o estudo de superfícies com grandes dimensões. A utilização da termografia de infravermelhos pode ser uma mais valia em várias fases da construção de edifícios e durante a fase de vida útil do mesmo [35]. Vários tipos de ensaios já foram realizados, quer em laboratório quer “in situ”, que comprovam a eficácia e utilidade da termografia de infravermelhos para a deteção de anomalias em edifícios.

Nos últimos anos, o seu uso tem sido cada vez mais relevante, não só na área da construção civil, mas também em outras que se aperceberam da sua potencialidade. Como exemplos de outras áreas em que é utilizada a termografia de infravermelhos temos: a medicina [36, 37]; medicina veterinária [38-41]; agricultura [42-44]; militar [45, 46]; arqueologia [42, 47]; manutenção de sistemas mecânicos e eletrónicos [48, 49]. Nas áreas mencionadas em cima, é possível analisar comportamentos anómalos de zonas ou equipamentos através das câmaras de infravermelhos, pois estes manifestam-se como diferenciais de temperatura não expectáveis quando comparados com zonas saudáveis em bom funcionamento.

3.2 APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETECÇÃO DE HUMIDADE

A humidade é uma das patologias mais frequentes nos edifícios. Normalmente, provoca uma degradação visual bastante acentuada e pode causar problemas de saúde aos habitantes. No entanto, também é possível que a humidade não apresente nenhuma degradação visualmente detetável, mas esteja presente nos elementos construtivos [30]. A humidade pode ter a sua origem devido a:

- Humidade na construção;
- Infiltrações;
- Humidade ascensional;
- Condensações.

A termografia de infravermelhos tem muito potencial para a deteção de humidade pois os fenómenos relacionados com a presença de água estão fortemente ligados à temperatura. Assim, o diferencial de temperatura provocado pela presença de água pode ser detetado pela câmara. Contudo, apesar da câmara conseguir detetar essas diferenças, nem sempre é possível perceber qual a sua origem. No caso de infiltrações e humidades ascensionais, é normalmente perceptível qual a zona causadora da anomalia por se encontrar num estado mais degradado. Na Figura 18 é possível ver que existe uma infiltração que começa a degradar o teto falso, mas que ainda não é perceptível a olho nu. É imprescindível a deteção precoce de defeitos associados à humidade antes que estes possam causar danos irreversíveis.

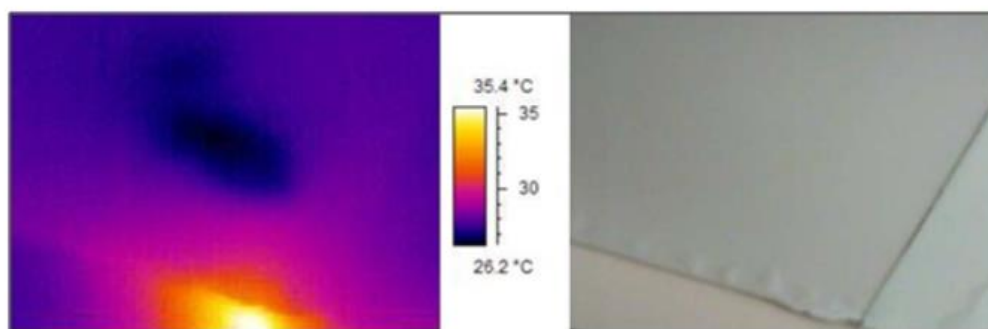


Figura 18 - Presença de água no termograma ainda invisível ao olho nu [34].

Analisando os termogramas, é possível detetar a presença de água, pois a temperatura superficial neste sítio é menor em relação à zona corrente. Isto deve-se ao arrefecimento provocado pelo fenómeno de evaporação da água na superfície do elemento [12, 13].

A termografia não se encontra confinada a inspeções realizadas no interior de edifícios, sendo também possível aplicá-la nas fachadas de forma a analisar o seu revestimento, como é o caso dos ladrilhos cerâmicos. A presença de água pode diminuir a ligação entre estes e o elemento de construção a que se encontram fixados. Ao contrário das paredes, é possível observar que a temperatura superficial de ladrilhos onde existe água, é maior do que nos secos. Contudo, caso exista um destacamento do cerâmico e neste esteja presente água, a combinação das duas anomalias podem “anular-se” termicamente e não serem visíveis numa inspeção termográfica [13]. Quando se realizam estudos termográficos de fachadas com o intuito de se encontrar humidade, é aconselhável que estes se realizem no início da incidência solar ou no início do sombreamento após o pôr-do-sol.

No trabalho realizado por Barreira, E. e V.P. de Freitas [12] analisou-se o efeito da absorção de água num bloco de betão e a sua secagem. Este bloco continha uma parte imersa em água, sendo que esta subia por capilaridade. É importante salientar que a humidade superficial é detetável na termografia devido às reações endotérmicas que acontecem na superfície [50]. O nível da água observado no bloco variou em relação à temperatura e à humidade relativa estabelecidas. Para um aumento de 5 °C e uma diminuição de 20% da humidade relativa, foi possível verificar uma clara diminuição do nível atingido pela água. A secagem do bloco também foi perceptível através dos termogramas. Após o fim do período de absorção, é possível observar a diminuição da humidade no bloco. Finalizado o processo de secagem, o bloco encontra-se em equilíbrio térmico com o ambiente, sendo que não é possível visualizá-lo nos termogramas.

Ainda no âmbito do mesmo trabalho, foi estudada a humidificação e secagem de um bloco de betão. O que se diferencia nesta segunda parte do trabalho é o facto de a humidade não ser ascensional, mas sim gotículas que são vertidas por uma das suas superfícies. As gotículas são vertidas durante o período de uma hora e depois permite-se a secagem do bloco. Após a hora inicial de humidificação, foram recolhidos termogramas da superfície, onde era claramente visível a presença de água, que é traduzida por uma temperatura inferior ao resto da superfície. Quando já não era perceptível a presença de água na superfície superior do bloco através dos termogramas, este foi virado 180° e capturado um termograma da superfície inferior. Neste último termograma, foi possível de observar a existência de vestígios da presença de água. Isto permitiu, mais uma vez, concluir que a termografia apenas permite visualizar a presença de água superficial [12, 50].

Uma das zonas mais usuais de ocorrência de humidade devido a infiltrações é na cobertura. Isto deve-se à falta de mão-de-obra qualificada, erros de construção, desgaste do material e falta de esquemas de pormenores. Sendo assim, a infiltração da água irá degradar a construção final ao longo dos anos, especialmente durante as épocas de chuva. Contudo, ao observar uma zona com humidade, a zona degradada pode não se encontrar diretamente por baixo do local de origem da infiltração. Através da termografia, pode ser possível localizar o local onde se encontra a maior concentração de água. Melrinho et al [51] comprovaram, através de ensaios em laboratório, a eficácia de deteção de humidade em impermeabilizações de coberturas. Neste caso, realizou-se a injeção de água entre uma membrana de impermeabilização e o suporte de um provete. Após isto, aqueceu-se o mesmo numa placa quente durante 30 minutos. Devido às zonas húmidas possuírem uma maior inércia térmica do que as zonas correntes, a sua manifestação nos termogramas capturados é através de zona com menor temperatura superficial. Contudo, devido à inércia térmica, a zona húmida consegue absorver e armazenar maiores quantidades de calor sem alterar o seu estado, ou seja, durante o período de arrefecimento, irá manter a temperatura por um período de tempo mais prolongado que as zonas secas [16, 50, 51].

Quando se realizam inspeções termográficas de infiltrações provenientes da cobertura, é aconselhável deixar o telhado acumular água durante a noite anterior à da inspeção, de forma a garantir o escoamento da água para a zona de interesse [15]. É, também, sugerido que, de forma a obter resultados fiáveis, se

imponha um fluxo de calor na zona analisada. Em laboratório, pode ser feita de forma artificial e “in situ” através da ação solar. Isto demonstra que é necessário ter em conta as condições climáticas na altura da inspeção, sendo que esta pode vir a ser condicionada.

3.3 APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETEÇÃO DE DESTACAMENTOS E DELAMINAÇÃO

Os azulejos, devido à sua resistência aos agentes atmosféricos, são um dos revestimentos mais utilizados em Portugal. No entanto, o destacamento destes é uma das maiores causas de degradação de fachadas. Além do impacto visual, pode causar perigos de segurança na zona de queda [31]. Existem várias causas que podem provocar esta anomalia, como, por exemplo: perda de coesão da argamassa de assentamento; empolamento do painel; assentamento deficiente; má execução das juntas; e a presença de água. É possível que a conexão dos azulejos ao elemento construtivo se esteja a degradar sem que seja perceptível. A termografia de infravermelhos pode contribuir para a deteção de azulejos que estejam em risco de queda ou que irão degradar-se mais rapidamente.

Outro exemplo de anomalia é a formação de bolsas de ar devido à má aplicação do azulejo. Estas bolsas de ar atuam como mais uma camada com uma determinada resistência térmica. Assim, o aumento da resistência térmica naquele local altera o fluxo de calor. Assim, nos termogramas, é possível localizar as bolsas de ar nos locais em que a temperatura superficial é diferente [13, 52]. É necessário ter em consideração que existem exceções à regra, tal como observado por Edis et al [53]. Neste trabalho, foram realizadas inspeções a revestimentos cerâmicos na fachada com o intuito de encontrar cerâmicos defeituosos. Foi observável que, apesar de alguns cerâmicos apresentarem indícios de delaminação, ao realizar uma inspeção termografia, a sua temperatura superficial não era sempre maior do que em zonas correntes (Figura 19). Na verdade, a termografia de infravermelhos permitiu detetar 70% a 78% das zonas defeituosas. Por este motivo, é aconselhável complementar a termografia com outros ensaios, caso seja possível, como, por exemplo, o ensaio do martelo.

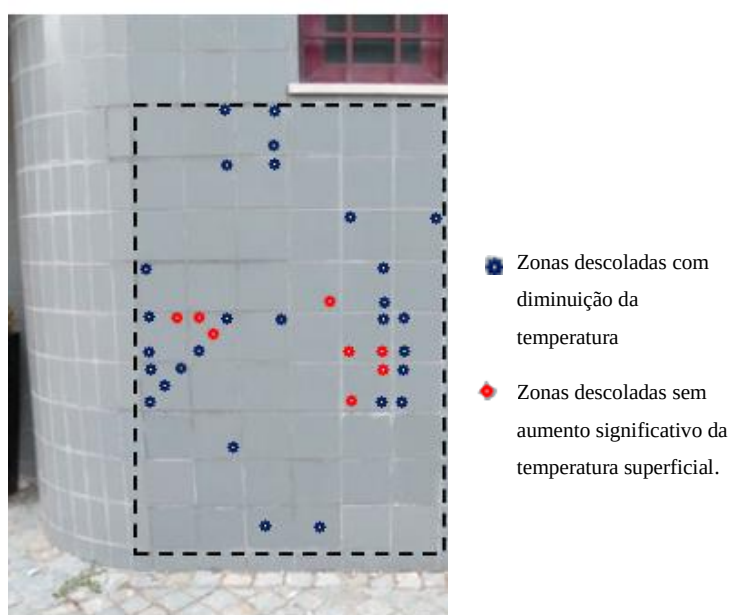


Figura 19 - Azulejos com indícios de delaminação em que: vermelho) não há alteração significativa da temperatura; azul) diminuição de temperatura [53].

Quer para deteção de defeitos de bolsas de ar, quer de humidade em fachada, é aconselhável que a obtenção dos termogramas seja feita durante o início de exposição solar, ou então, no início do período de sombreamento. No entanto, a temperatura superficial aumenta mais rapidamente em zonas delaminadas do que em zonas com humidade. Na fase de arrefecimento, também é possível distinguir com facilidade estas anomalias, visto que, no caso da humidade, esta armazena calor durante mais tempo do que zonas com bolsas de ar que, em contrapartida, arrefecem mais rapidamente do que as zonas correntes [54]. Ao contrário da humidade presente nos elementos construtivos, que é visível nos termogramas devido às reações de evaporação que se dão na superfície, o uso de azulejos não permite que ocorra a evaporação. Então, para estas condições, é expectável que aconteça um acumular de calor. Por isso, não se deve esperar que a presença de água se manifeste sempre da mesma forma, estando dependente das propriedades dos materiais utilizados. Todas as análises referidas previamente podem ser realizadas “in situ” de forma passiva. Contudo, também é possível realizar uma análise quantitativa de forma a classificar a severidade dos defeitos [55].

A análise de destacamento através da termografia não se cinge apenas ao revestimento de azulejo. A má aplicação de um sistema ETICS (sistema de isolamento térmico pelo exterior) ou a má aplicação de um reboco em que existam bolsas de ar, exibem o mesmo comportamento que uma bolsa de ar em um azulejo (Figura 20). A existência da bolsa de ar também aumenta a resistência térmica que, por sua vez, provoca uma variação da temperatura. A variação da temperatura pode acelerar a degradação dos materiais e provocar fissuras, o que irá causar patologias mais graves [13].

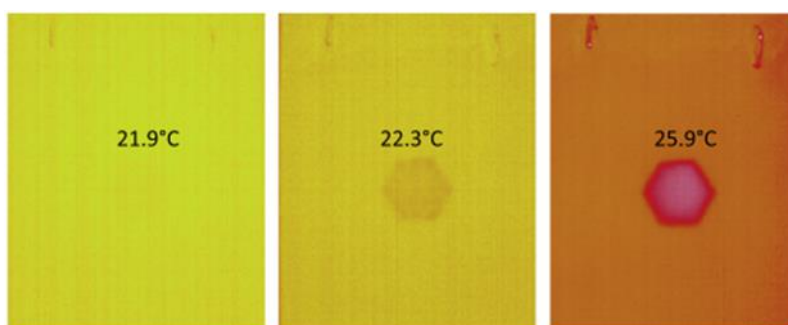


Figura 20 - Análise de um aumento de temperatura num destacamento em relação à zona corrente [10].

3.4 APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETEÇÃO DE PONTES TÉRMICAS

As pontes térmicas são zonas na envolvente dos edifícios onde a resistência térmica é alterada consideravelmente em relação à zona corrente. Esta alteração é causada pela existência de materiais com diferentes condutibilidades térmicas ou pela modificação da geometria. As zonas mais comuns de ocorrerem pontes térmicas são: pilares; vigas; lintéis e lajes. Estes locais interrompem os panos de alvenaria da envolvente. É de grande interesse fazer o tratamento de pontes térmicas, pois são zonas que apresentam uma ineficiência energética que compromete o conforto térmico do edifício [56] (Figura 21). Através destes locais ocorrem perdas de calor durante o Inverno e ganhos de calor durante o Verão. É, também, usual nestes locais ocorrerem condensações que levam à origem de fungos, degradando os materiais.

Como existe uma alteração da condutibilidade térmica, estas patologias são detetáveis em termogramas. Contudo, a sua manifestação nos termogramas depende da altura do ano em que é realizada. No caso duma inspeção a partir do exterior do edifício, as pontes térmicas manifestam-se da seguinte forma: no Inverno, é observável como uma área de cor clara, o que significa que se encontra mais quente que as outras zonas; no Verão, observa-se o oposto. Caso se faça uma inspeção a partir do interior do mesmo edifício, é expectável que ocorra o inverso da inspeção do exterior. No Inverno, observa-se a área com uma cor mais escura e no Verão com uma cor mais clara, devido aos ganhos de calor. É, também, relevante referir que é necessário ter em conta o revestimento da fachada. Caso este não seja homogéneo, podem ocorrer alterações de temperatura que não sejam derivadas de pontes térmicas.

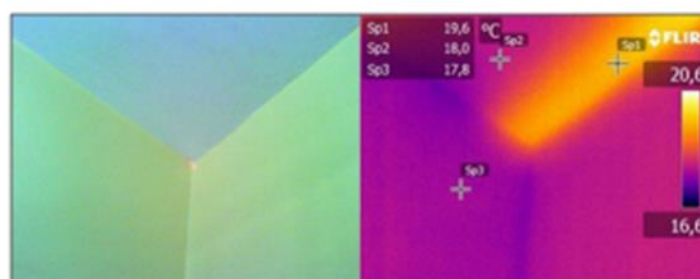


Figura 21 - Manifestação de ponte térmica num termograma [34].

Na inspeção de pontes térmicas, é possível realizar uma análise quantitativa de forma a verificar a severidade destas e se existe a possibilidade de ocorrer condensações ou o crescimento de bolores. Em [17], Pearson refere um método de avaliar a ocorrência de condensações derivado a pontes térmicas. Utilizando a termografia de infravermelhos, determina-se a temperatura superficial interior (T_{si}), depois é necessário obter os valores da temperatura exterior (T_e) e a temperatura interior (T_i). De seguida, obtém-se o valor do índice térmico a partir da seguinte equação:

$$IT = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad (11)$$

De forma a que não ocorram condensações, o valor do índice térmico tem de ser superior ao valor crítico, que normalmente para habitações é 0.75. Contudo, é importante de referir que este valor pode variar consoante o tipo de construção.

3.5 APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETECÇÃO DE DEGRADAÇÃO E FALHAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

O isolamento térmico é um elemento fundamental na construção de um edifício de forma a garantir uma boa eficiência energética e garantir o conforto térmico dos utilizadores. Uma casa com excelente isolamento tende a manter a temperatura interior ao longo do ano, independentemente de calor ou frio acentuados no exterior. A sua função é dificultar a transferência de calor pelos elementos construtivos para espaços exteriores. O isolamento térmico permite, assim, reduzir as perdas de calor por condução através da envolvente do edifício (chão, paredes e telhado) durante o Inverno e limitar os ganhos de

calor durante o Verão. Assim, é possível reduzir os custos de energia associados ao aquecimento e arrefecimento da habitação e melhorar o conforto térmico. Alguns exemplos de isolamentos térmicos são:

- Lã de rocha;
- Lã de vidro;
- Aglomerado de cortiça;
- Poliestireno Expandido

Entre eles existem várias diferenças. Uns comportam-se melhor como isolamentos térmicos, outros isolam termicamente e acusticamente, enquanto que outros tem melhor resistência ao fogo. A escolha do material correto e mais adequado cabe ao projetista, que o deverá definir em função do uso pretendido.

É possível que durante a construção da habitação, ocorram erros na aplicação do isolamento térmico. Isto vai criar uma zona com transferência de calor anómala, permitindo mais ou menos trocas do que o esperado. Estas zonas são visíveis nos termogramas tendo uma temperatura superficial maior ou menor do que o normal, com linhas bem definidas, como é possível de observar na Figura 22 [16, 35]. Nestas zonas, é possível ver através dos termogramas, uma diferença de cerca de 11°C entre a temperatura superficial interior e a exterior. Este tipo de patologia é mais facilmente detetada quanto maior for a variação da irradiação solar (ou a temperatura do ar) [52].



Figura 22 - Manifestação termográfica de isolamento mal aplicado [35].

Por vezes, as falhas de isolamento não são originadas pela má aplicação do mesmo, mas sim, devido à sua degradação natural. Este fator é um fator importante a ter em conta e, por este motivo, devem ser realizadas inspeções periódicas que garantam a continuidade do seu funcionamento. No trabalho realizado por Ortiz-Sanz, J., et al. [57], analisou-se termograficamente uma cave de vinhos. De forma a preservar e produzir o vinho, é necessário ter um controlo rigoroso da temperatura e, por essa razão, o isolamento térmico tem de estar em perfeitas condições. Através da termografia, foi perceptível uma zona

em que o isolamento não estava a cumprir a função pretendida, comprometendo a integridade da produção do vinho (Figura 23).

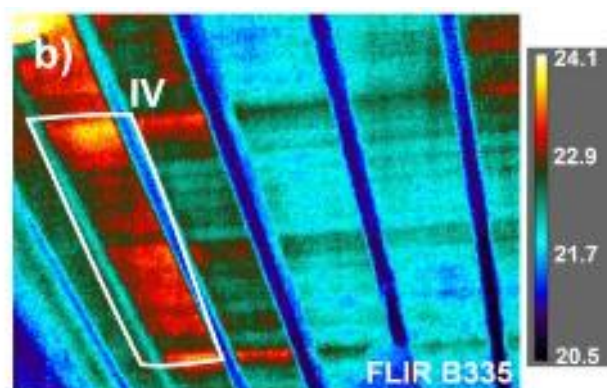


Figura 23 – Área sem isolamento térmico [57].

3.6 APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETEÇÃO FUGAS/INFILTRAÇÕES DE AR

A estanquidade ao ar de uma habitação é um ponto bastante relevante para o conforto térmico. As fugas de ar são as trocas indesejadas de ar que se dão entre o interior e o exterior, através da envolvente do edifício. Se as trocas de ar se derem do exterior para o interior, é denominado por infiltração, se for do interior para o exterior, é exfiltração [16]. Na casa típica construída no fim do século XX, as infiltrações de ar têm um contributo relevante para a perda de calor [17]. O ensaio habitualmente realizado para avaliar a estanquidade ao ar é o da porta ventiladora. Contudo, este ensaio apenas permite medir a estanquidade e não o local de origem da infiltração ou fuga de ar.

Realizando uma inspeção termográfica nas zonas mais usuais de ocorrência de infiltrações, pode ser possível localizar os pontos de entrada de ar. Em inspeções realizadas pelo interior, é conveniente que as trocas sejam realizadas sobre a forma de infiltração, no entanto, para que o ar seja visível no termograma, é necessária uma diferença de temperatura de pelo menos 5 °C [6, 17]. Caso o fluxo de ar não esteja a ser feito da forma pretendida, é possível despressurizar de forma controlada o interior da habitação com o auxílio de equipamentos mecânicos. Esta despressurização garante um fluxo do exterior para o interior e é aconselhável que a pressão interior do edifício esteja negativa, no mínimo, durante duas horas antes da inspeção [58]. Em termos da pressão utilizada, é possível observar os efeitos das anomalias para baixas pressões mas, quanto maior for a pressão utilizada, mais fácil será observar o seu efeito [59]. Os locais mais usuais para se encontrar este tipo de anomalia é nas portas e nas janelas, sendo que estes elementos não se encontram devidamente estanques. Como é garantido o fluxo do exterior para o interior e um diferencial de temperatura entre os dois climas, é exetável que o ar das infiltrações se manifeste nos termogramas com uma cor mais escura, devido à sua temperatura ser mais baixa (Figura 24). Comparando a Figura 22 e a Figura 24, é possível concluir que, nas infiltrações de ar, ao contrário dos defeitos em isolamento térmico, a sua manifestação ocorre de uma forma irregular, apresentando um padrão “raiado”.

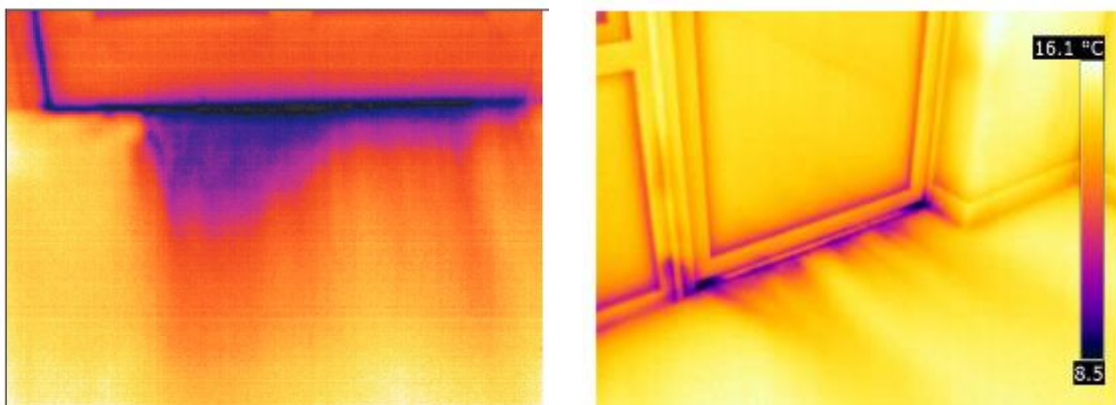


Figura 24 - Infiltração de ar por uma com caixilharia incorretamente isolada [17, 35].

É necessário ter em conta que a termografia apenas permite visualizar qual o local onde se encontra a infiltração, e não medir o fluxo de ventilação. Após a zona crítica ser devidamente localizada, pode iniciar-se a sua reparação. Contudo, é de extrema importância ter cuidado na reparação destes defeitos, de forma a não diminuir muito o número de renovações horárias de ar e, assim, pôr em risco a saúde dos utilizadores.

3.7 APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETEÇÃO DE PORMENORES ESCONDIDOS

Os pormenores escondidos são, por exemplo, tubos existentes dentro do pavimento ou das paredes dos quais não se sabe a sua posição específica. Estes elementos normalmente são:

- Tubos de drenagem
- Tubagem de chaminé que permite a exaustão de fumos
- Tubagem de pavimentos radiantes
- Tubos de abastecimento de água

A aplicação da termografia de infravermelhos permite a deteção de pormenores escondidos com grande precisão, desde que exista um diferencial de temperatura entre estes e o elemento em que se encontram embutidos. Por isso, o tempo que é necessário para observar as tubagens depende da difusividade ao calor do elemento a que pertence e da profundidade a que este se encontra. É expectável que, em paredes ou pavimentos mais finos, o tempo necessário para provocar um diferencial de temperatura entre a tubagem e elemento construtivo seja menor que em paredes mais grossas [16]. Ao saber a posição exata destes pormenores escondidos, pode ser possível reduzir drasticamente os custos de manutenção pois a reparação é feita especificamente no local da anomalia. A forma como a patologia se manifesta nos termogramas depende do tipo de função para que é utilizada a tubagem.

Chaminé e sistemas AVAC

A chaminé é um tubo que permite a ligação entre dois ambientes - o interior e o exterior. Normalmente, são utilizadas nos telhados e permitem a exaustão de fumos e vapores de água provenientes da lareira,

fogão ou churrasqueira. De forma a funcionar corretamente, a tubagem da chaminé necessita de aquecer de forma a criar um efeito de vácuo e expelir os fumos de forma ascensional. No caso da lareira, o tubo de exaustão encontra-se revestido por uma camada de isolamento térmico com o intuito de permitir que o seu aquecimento se realize o mais rapidamente possível e que o calor não se propague descontroladamente para a estrutura envolvente. Na hipótese de ser comprometida a integridade do isolamento, ser mal aplicado ou simplesmente não ser aplicado, se a envolvente não possuir materiais próprios para resistir ao calor, este pode propagar-se e provocar fissuras devido à expansão dos materiais face ao aumento de temperatura. Este efeito é observável na Figura 25, um caso de estudo que foi analisado em contexto de unidade curricular de Manutenção e Reabilitação de Edifícios.

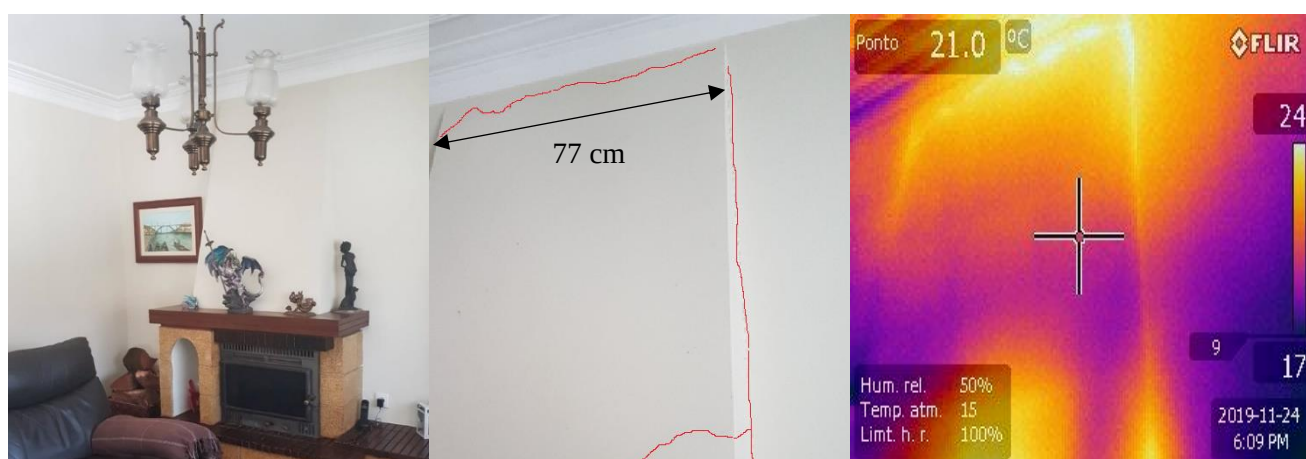


Figura 25 - Fissuras provocadas na chaminé devido à expansão térmica.

Caso exista um sistema de climatização de ar, ventilação e ar condicionado (AVAC), também é possível inspecionar se este se encontra devidamente isolado e se se encontra em correto funcionamento (Figura 26). Além da falta de isolamento poder provocar desconforto aos utilizadores que se encontrem na divisão onde se localiza esta descontinuidade, esta apresenta-se também como uma ineficiência energética e, por estes motivos, deve ser corrigida. No entanto, durante a construção, estes sistemas apenas costumam ser aplicados perto do final do processo construtivo, por isso, não é possível a sua inspeção com o recurso à termografia numa frase preliminar. É necessário ter em conta que a inspeção termográfica destes sistemas nem sempre é possível ser realizada. Como exemplo desta situação é caso das condutas do sistema AVAC que se localizem num teto falso e que tenham um espaço de ar entre as várias superfícies envolventes [35].



Figura 26 - Diminuição de temperatura superficial provocado por sistema AVAC [35].

Em escritórios é usual existirem sistemas de fornecimento de ar de forma a manter utilizadores qualidade do ambiente interior. Porém, estes sistemas podem não estar a funcionar corretamente e, caso exista um grande número de saídas de ar e estas se encontrarem em locais de difícil acesso, torna muito demorado uma inspeção realizada individualmente a cada uma delas [60]. Com recurso à termografia, é possível perceber se estas se encontram a funcionar corretamente de uma forma mais rápida. A termografia não permite fazer o diagnóstico do problema, no entanto, permite identificar o incorreto funcionamento do sistema (Figura 27 e Figura 28).

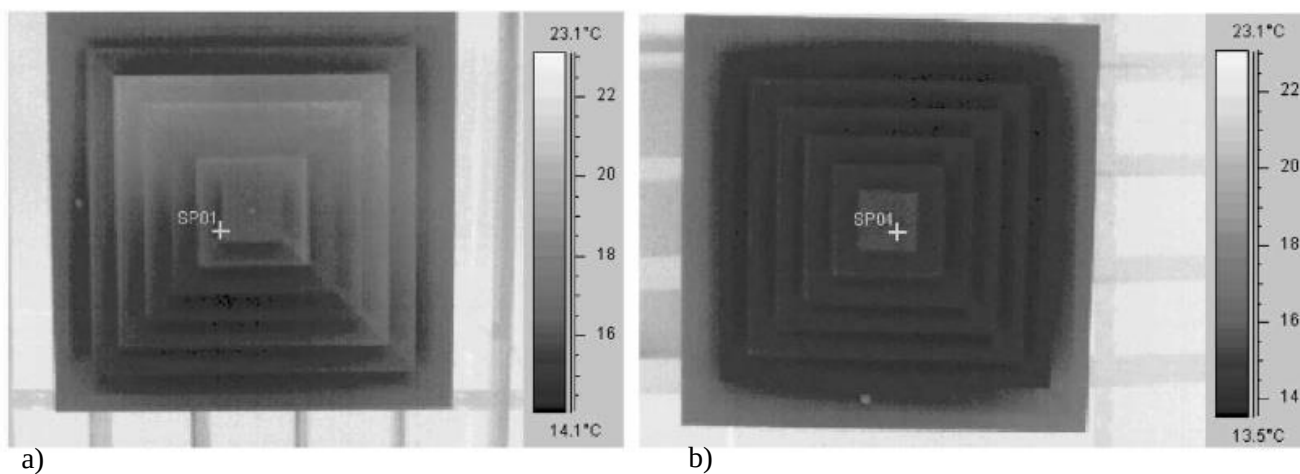


Figura 27 - Termogramas de saídas de ar em que: a) má distribuição do fornecimento de ar; b) apresenta o correto funcionamento do sistema [16].

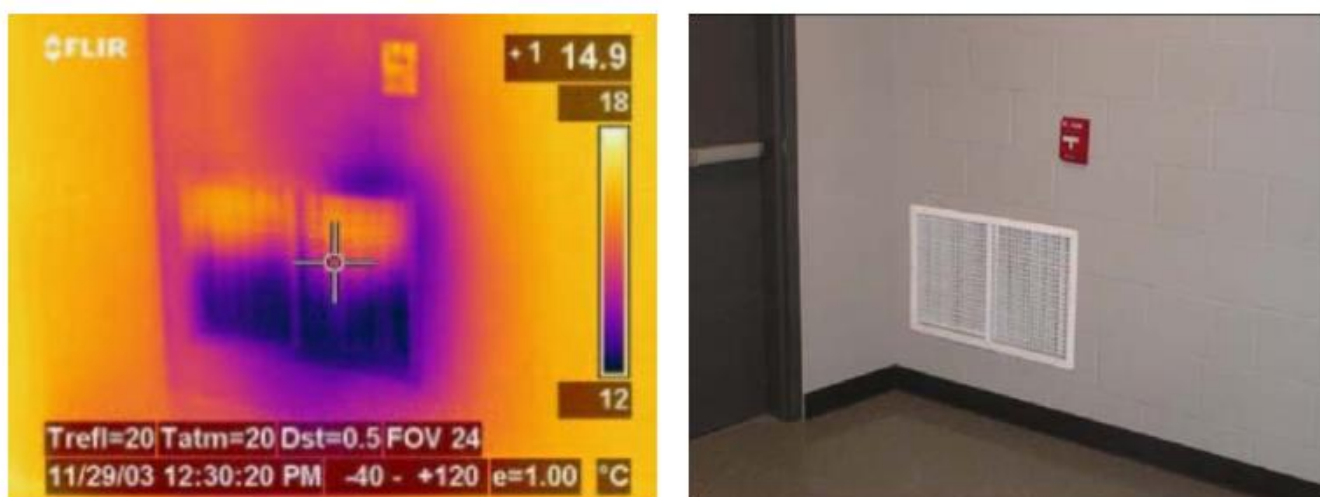


Figura 28 - Sistema de ar horizontal com incorreta distribuição de ar [60].

Tubo de abastecimento e drenagem

As inspeções termográficas em tubos de abastecimento e drenagem permitem verificar a sua integridade ou eventual degradação. Estes tipos de anomalias ocorrem ao longo do ciclo de vida das tubagens, especialmente nos locais onde fazem um ângulo de 90°, local este onde é usual acontecer. Quando se realiza uma inspeção termográfica a tubos de drenagem e abastecimento de águas, também é necessário aplicar um diferencial de temperatura de forma a que se possa distinguir as tubagens do elemento construtivo em que se encontra inserido. Uma forma de o conseguir é fazendo circular água pelas tubagens. Em alternativa, se nestas não existir um fluxo de líquido, é possível, através do método ativo, aplicar artificialmente este diferencial de temperatura utilizando, por exemplo, uma lâmpada de halogéneo ou pistola de calor para assim conseguir diferenciar a tubagem em estudo [16].

Caso se dê a rotura de um tubo, é possível localizar com mais facilidade o local. Nos termogramas, a anomalia é observável com uma temperatura inferior ao resto do elemento devido à presença da água. Assim, é possível atuar no local de rotura, sem ter de fazer perfurações adicionais no elemento e assim reduzir significativamente os custos de reparação.

Pavimentos radiantes e Radiadores

Os tubos utilizados em sistemas de aquecimento à base de água correm o risco de sofrer corrosão local do isolamento superficial. Os tubos de aço utilizados podem sofrer corrosão devido às temperaturas elevadas às quais os fluidos circulam (cerca de 90°C) e, com o tempo, pode provocar fugas de água ou condensações no isolamento que separa o líquido do tubo. A termografia de infravermelhos permite a deteção destes problemas antes que a anomalia se torne demasiado grave. Por conta do isolamento, apenas é possível detetar com câmara termográfica a diferença entre o isolamento que se encontra húmido e o isolamento seco. Onde o isolamento aparente humidade, é presumível que tenha ocorrido uma rotura [16]. Assim, é expectável que, em zonas de isolamento térmico húmido, tenha ocorrido algum tipo de corrosão. Este tipo de condutas são, normalmente, utilizadas para fazer a distribuição de água quente aos radiadores e pavimentos radiantes. Tal como nas tubagens de abastecimento ou

drenagem, é necessário aplicar um diferencial de temperatura que, neste caso, significa apenas ligar o sistema de aquecimento, e assim as zonas aquecidas são facilmente identificáveis (Figura 29).

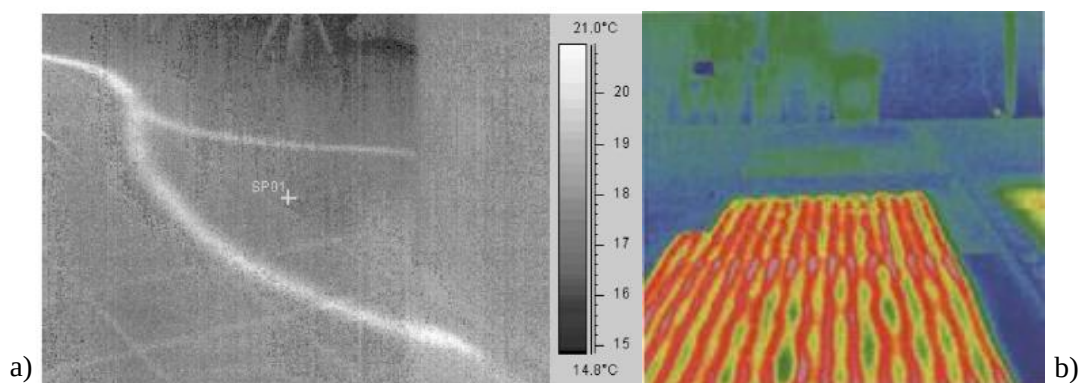


Figura 29 - Termograma de: a) tubos de ligação do fluido do sistema de aquecimento; b) pavimento radiante [6, 16].

3.8 APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA - U

O consumo de energia de uma habitação pode ser reduzido ao melhorar e tornar mais eficaz as trocas de calor entre o interior e as paredes da envolvente em contacto com o ambiente exterior. O parâmetro que define as trocas de calor através dos elementos construtivos é o coeficiente de transmissão térmica (U). A medição do valor do U pode ser feita de várias formas.

A primeira, através do procedimento descrito na norma ISO 6946. Contudo, de forma a utilizar este método, é necessário saber quais os constituintes das paredes analisadas através de informações de projeto, ensaios de perfuração ou comparando com edifícios semelhantes construídos na mesma época [61, 62]. Estes pontos referidos anteriormente provocam uma grande incerteza nos valores obtidos, pois nem sempre o que é representado nos projetos representa a realidade do produto final construído. É também possível que nem exista informação dos constituintes das paredes no caso de edifícios mais antigos. No caso dos edifícios históricos, é impossível realizar ensaios destrutivos de forma a saber as camadas constituintes das paredes. Também, nem sempre os valores tabelados representam a condutividade térmica real. Por exemplo, a condutividade térmica do tijolo furado é dependente, não só do tamanho dos vazios, mas também da sua geometria [63]. O reboco utilizado também tem um valor padrão, mas a sua mistura e a espessura ao longo do elemento podem não ser constantes. Por último, é necessário ter em conta os casos referidos no subcapítulo 3.5, em que a má aplicação e a degradação do isolamento térmico altera o comportamento da parede, fazendo com que os valores de U determinados em laboratório não correspondam com os valores reais do edifício.

No segundo método, o cálculo do valor de U é feito através de um medidor do fluxo de calor (Heat Flow Meter ou HFM). Este instrumento é capaz de calcular o valor instantâneo e médio da transmissão, como uma relação entre o fluxo de calor através da parede e a diferença entre a temperatura interna e externa da parede. O período de recolha de valores ocorre durante pelos menos 72 horas, sendo que, para paredes com uma elevada inércia térmica, pode ser necessário mais tempo. A maior desvantagem da utilização deste método de determinação do valor de U é o facto de apenas permitir determinar o valor pontual da zona. Caso se queira saber o valor de outro local no mesmo elemento construtivo, é necessário repetir

todo o processo. Isto torna o processo pouco prático na eventualidade de existirem zonas com isolamento térmico degradado, visto estas não serem sinalizadas se não forem analisadas. Zonas como pontes térmicas, humidades e bolores influenciam os resultados. Também é difícil obter o valor correto em superfícies muito rugosas pois estas não permitem fixar totalmente o sensor. Os valores obtidos através deste método por vezes não são exatamente iguais aos calculados no primeiro método, situação esta que se evidencia mais em edifícios históricos, onde a diferença entre ambos pode variar entre 2% a 58% [64].

Devido ao facto de o valor do coeficiente transmissão térmica estar ligado às trocas de calor, a termografia torna-se uma ferramenta com potencial para o cálculo do mesmo. Assim, é possível estimar o seu valor ao longo de grandes áreas sem ser necessário realizar ensaios destrutivos. Obviamente que, de forma a obter o valor correto de U , é necessário realizar uma análise quantitativa e, por essa razão, é obrigatória a obtenção correta dos valores dos parâmetros que caracterizam as superfícies. Deste modo, as condições ambientais são extremamente importantes, sendo necessário ter especial atenção à velocidade do vento, que nunca deve ser superior a 1 metro por segundo (ideal quando a velocidade é inferior a 0,2 m/s), não existir incidência solar direta, existir uma diferença de 10 °C a 15 °C entre o interior e exterior. Outros parâmetros que têm um impacto significativo no cálculo são o valor da emissividade e a temperatura refletida [61, 63-66].

Quanto ao valor da emissividade, não é suficiente a utilização de valores tabelados pois este pode ter sofrido alterações devido à exposição ao ambiente, a rugosidade, o envelhecimento do material e a sua forma [63]. De forma a calcular o valor da emissividade do elemento, pode ser colada uma fita preta com uma emissividade conhecida e espera-se até que esta entre em equilíbrio térmico com o elemento. Ainda assim, a emissividade da fita e do elemento não é a mesma, por isso a temperatura de ambos captada pelos termogramas é diferente entre os dois. Contudo, sabemos que a temperatura entre os dois é igual devido a se encontrarem em equilíbrio térmico. Assim, podemos alterar a emissividade da câmara, até que a temperatura da parede seja a mesma que a temperatura inicial da fita.

A temperatura refletida é a temperatura aparente que o elemento em análise reflete através dos objetos nas proximidades para a câmara termográfica. Assim, a determinação do valor desta temperatura é necessária de forma a que os resultados termográficos não sejam deturpados. A forma de calcular este parâmetro é utilizando uma folha de papel de alumínio que, primeiramente, foi amassada e depois esticada. De seguida, a folha é colada na zona de interesse e, tal como a fita preta, deixa-se que a sua temperatura estabilize até ser a mesma que no elemento analisado, estando assim em equilíbrio térmico. Por último, na câmara termográfica é estabelecido um valor de emissividade de 1 e a temperatura média da folha de alumínio corresponde à temperatura ambiente refletida [61, 63].

É sugerido por Fokaides e Kalogirou [63] que este tipo de inspeção termográfica seja realizada durante a noite ou durante um dia nublado de forma a que não exista radiação solar incidente. A radiação solar, ao incidir no elemento analisado, aumenta a temperatura observada de uma forma desfasada devido à inércia térmica do edifício, o que pode levar a valores duas vezes maiores do que o esperado. Desta forma, é expectável que o cálculo do coeficiente de transmissão térmica através da termografia, em certas alturas do ano, nomeadamente durante a Primavera e o Outono, não produza valores fiáveis. Deve também, aquecer-se ou arrefecer-se o interior do edifício durante cerca de 3 horas antes de cada inspeção termográfica, de forma a garantir condições estáveis de trocas de calor.

Nardi e Ambrosini [61] propuseram uma fórmula de cálculo do valor de U através de parâmetros que podem ser obtidos através da termografia de infravermelhos, tornando assim prático o seu uso, uma vez que não é necessário equipamentos adicionais. A fórmula mencionada é a seguinte:

$$U = \frac{5.67 \times \varepsilon_{TOT} \times \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] + 3.8054 \times v \times (T_w - T_{out})}{(T_{int} - T_{out})} \quad (12)$$

Nesta fórmula, T_{int} corresponde à temperatura interior, T_{out} à temperatura exterior, T_w é a temperatura superficial do elemento analisado, v a velocidade do vento e ε_{tot} é a emissividade do elemento analisado. Neste estudo também se utilizou o medidor de fluxo de calor de forma a comparar a diferença entre este, a termografia e o valor calculado em projeto. Os estudos realizaram-se em dois dias distintos, no dia 22 de Fevereiro (dia nublado) e 27 de Fevereiro (dia com céu limpo). Os valores de U obtidos através da termografia para o dia 22 não variam muito em relação aos outros métodos utilizados (16,12% e 1,69% para o valor de cálculo e o HFM respetivamente). Para o dia 27 as variações entre os métodos foram maiores, no entanto ainda considerados aceitáveis (23,38% e 37,28%). Estes valores demonstram a importância da escolha do dia e horas corretas para realizar os ensaios termográficos de forma a obter o valor mais correto de U .

Noutro estudo realizado por Fokaides e Kalogirou [63], também se comparou as medições termográficas com os valores obtidos de através do HFM e os definidos em projeto. Neste trabalho, os autores, de forma a evitar os efeitos da inércia térmica, taparam os elementos observados da radiação solar, provocando um sombreamento sobre eles. De todos os elementos analisados, as coberturas foram os que apresentaram valores mais irregulares. Porém, isto deve-se ao facto de que durante o dia é quase impossível garantir a totalidade do seu sombreamento. Em relação aos equipamentos usados (termografia e HFM), o que obteve os valores mais aproximados com os de cálculo de projeto foi o medidor de fluxo de calor. Mas é necessário ter em conta que apenas se realizaram 10 termogramas (um termograma a cada 20 min durante 3 horas) e o HFM realiza uma medição por segundo o que em três horas perfaz um total de 10 800 medições. Dos parâmetros relevantes para a análise, dois destacaram-se como os que influenciam mais os resultados finais: a emissividade e a temperatura refletida. A diferença de 1 °C na medição da temperatura refletida corresponde a um erro de 10% na temperatura superficial da parede. Este erro por sua vez, irá provocar um aumento significativo do valor do cálculo de U , aumentando-o em 100% (Figura 30). Os valores obtidos através da termografia diferenciam entre 10% a 20% dos valores definidos em projeto, sendo que, em várias situações, com o uso do HFM, os valores eram mais aproximados. Contudo, os autores concluíram que isto não indica que a termografia é um método menos preciso e eficaz, pelo contrário, como este tem em conta fatores que não são considerados em outros métodos, os resultados podem ser mais corretos e traduzem melhor a situação real do comportamento da envolvente.

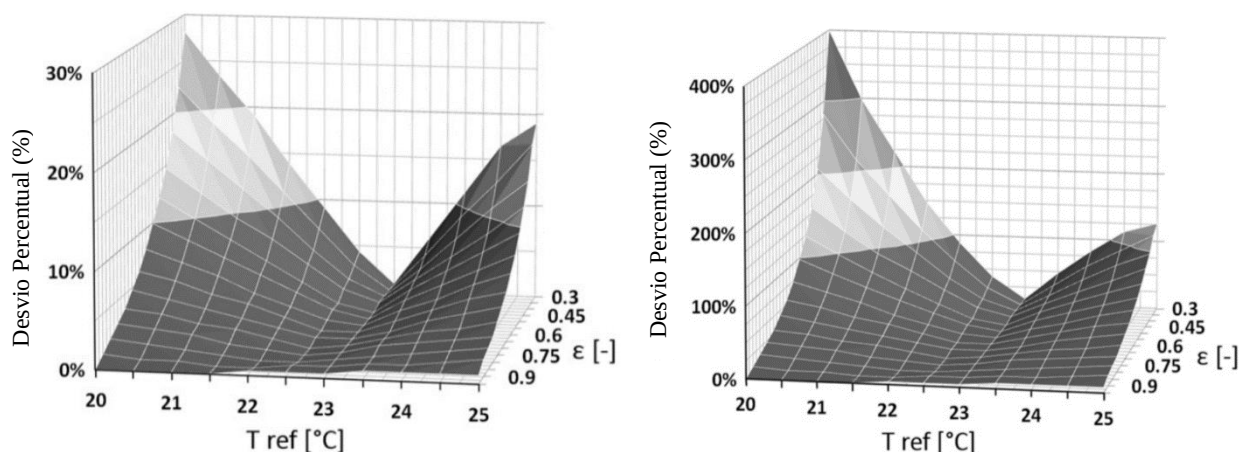


Figura 30 – a) Variação da temperatura superficial em função da temperatura refletida e da emissividade; b) Variação do valor de U em função da temperatura refletida e da emissividade [63].

O método a utilizar de forma a calcular os valores de U pode depender do elemento a ser analisado pois, em relação a paredes maciças, o erro em relação ao valor de cálculo é menor na termografia do que através do medidor de fluxo de calor [66]. Diferenças entre os valores de cálculo e a termografia de cerca de 10% a 25% são considerados aceitáveis.

Concluindo, a termografia de infravermelhos apresenta-se então como uma ferramenta com elevado potencial para o cálculo do valor de U de forma a dar informação realista do desempenho energético do edifício. Existem parâmetros que têm de ser tidos em conta, uma vez que podem influenciar significativamente os resultados. Também, quanto maior o diferencial de temperatura entre o clima exterior e o interior, mais estáveis são as trocas de temperatura, traduzindo-se, assim, em resultados mais fiáveis. [67].

3.9 APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS PARA A ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

A termografia de infravermelhos tem-se mostrado uma ferramenta capaz de realizar ensaios não destrutivos e de diagnóstico. Este atributo da termografia torna bastante apelativo o seu uso na inspeção de edifícios históricos, onde é difícil, ou até mesmo impossível, serem realizados ensaios destrutivos. O facto de ser impraticável realizar ensaios destrutivos, torna impossível ter acesso ao tipo de intervenções realizadas previamente no edifício, o que, por sua vez, limita a forma de realizar futuros planos de renovação e manutenção. Além disto, é altamente aconselhável realizar uma análise da estrutura histórica, pois o tratamento de restauração ou de conservação pode causar danos irreparáveis à mesma [68]. Este tipo de degradação estrutural provocado por intervenções de restauração já efetuadas com materiais não compatíveis, pode causar uma aceleração dos danos no local intervencionado. Assim, de forma a realizar uma intervenção num edifício deste género, é necessário fazer uma análise estrutural e uma avaliação correta das patologias com base em padrões estruturais, nos elementos constituintes dos panos de alvenaria e o seu revestimento, que não são perceptíveis visivelmente. Deste modo, uma análise termográfica permite fazer um mapeamento dos danos e realizar uma análise qualitativa e quantitativa

sobre estes e a natureza dos mesmos [69]. Contudo, de forma a analisar os elementos em profundidade, é necessário realizar análises segundo o método ativo. Alguns dos fatores que necessitam ser escolhidos previamente são a altura do dia e as condições meteorológicas visto que a orientação, o tipo de utilização, os materiais e as dimensões podem influenciar a sua escolha.

Previamente à realização de uma inspeção termográfica, é necessário conhecer os materiais constituintes do edifício histórico, isto porque é necessário prever qual o seu comportamento e os padrões expectáveis a serem observados pela câmara de infravermelhos. Alguns dos parâmetros mais importantes a ter em consideração são: condutividade; difusividade; efusividade; calor específico; emissividade; absorção; reflexão; transmissão; e porosidade [68]. Todos estes parâmetros são importantes na inspeção de edifícios habitacionais, mas, devido ao cuidado de planeamento que é necessário na intervenção e análise de edifícios de carácter histórico, é imprescindível ter o máximo de rigor na sua determinação. Além do mais, a medição destes parâmetros permite adicionar informação valiosa sobre o estado de conservação dos elementos. Também é possível, conhecendo os parâmetros mencionados em cima, realizar simulações numéricas que permitem prever quais as variações de temperaturas expectáveis quando é exposto a um diferencial de temperatura sobre os elementos e evitar a realização de testes desnecessários [70, 71]. Devido ao processo térmico ser extremamente difuso, um dos pontos chave na realização de simulações numéricas é a espessura da camada de acabamento. Como é impossível saber qual a sua espessura sem ser de forma intrusiva, nas simulações deve ser considerado um parâmetro variável [70].

A utilização da termografia em edifícios históricos permite realizar a monitorização de estruturas escondidas atrás de camadas espessas de reboco nas paredes (arcos, janelas e chaminés, entre outras), detetar zonas com presença de água, analisar o estado dos acabamentos, analisar o preenchimento das juntas de argamassa e a localização de fissuras na alvenaria por baixo do reboco.

Numa inspeção termográfica realizada à Cappella degli Scrovegni por Grinzato et al [71], foi possível observar alguns dos pontos mencionados em cima. Quanto às estruturas escondidas, observaram-se duas através dos termogramas. A primeira, foi uma abertura na abóboda que se manifestava como uma zona mais fria que o restante. A segunda, uma estrutura escondida por trás do fresco com a função de suportar o mesmo (Figura 31). Esta estrutura havia sido colocada numa reabilitação anterior.

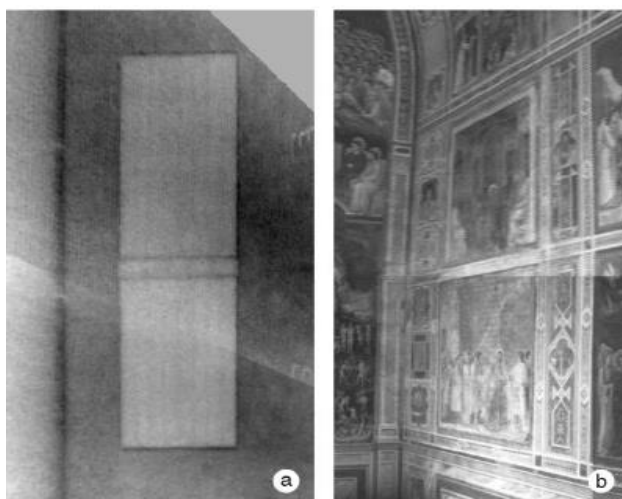


Figura 31 – a) Estrutura escondida com função de suportar o fresco; b) Imagem da parede onde se encontra a estrutura [71].

O estudo da alvenaria por baixo da camada de reboco, também é considerado um pormenor escondido de grande interesse pois permite determinar quais as zonas onde é provável a ocorrência de fissuras da camada superficial [69]. Normalmente este tipo de fissuras ocorre na zona onde está presente a argamassa que une as pedras. É, também, possível observar zonas em que a argamassa apresenta sinais de delaminação que, por sua vez, pode originar mais fissuras e levar a patologias mais graves e com dimensões muito maiores.

A reparação de danos causados pela humidade é de extrema importância para a preservação de edifícios históricos. O conhecimento da localização da humidade dentro dos elementos construtivos é fundamental de forma a analisar a degradação dos materiais, especialmente em climas frios, devido aos ciclos de gelo/degelo. A deterioração dos materiais ocorre de forma diferente em função do nível de água no interior da parede. A presença de humidade neste tipo de edificações manifesta-se da mesma forma que nos edifícios destinados à habitação [30, 68-71]. As zonas com presença de humidade superficial apresentam uma temperatura superficial inferior às zonas secas devido à ocorrência de reações endotérmicas na superfície. Numa análise termográfica, é possível observar zonas em que as sarjetas estão degradadas e podem estar a humidificar as paredes que se encontrem perto destas [30]. A maioria dos edifícios antigos é afetada pela presença de humidade devido à subida capilar da água do solo que, por vezes, traz sais dos mesmos e desgasta mais rapidamente os materiais [70]. No caso de humidade ascensional, a aplicação do método de termografia ativa permite aumentar o contraste entre as zonas secas e as zonas húmidas, dando uma informação detalhada da sua distribuição espacial, melhorando assim o processo de decisão na escolha da forma de intervir [69].

A identificação de pontes térmicas em edifícios históricos que recebam visitantes é uma patologia que deve ser corrigida. Isto porque, a diminuição da temperatura superficial junto com o vapor de água gerado pelos visitantes, pode provocar condensações superficiais que, por sua vez, causem a degradação das superfícies não só pela ocorrência de condensações, mas, também, por possíveis desenvolvimentos de bolores [71].

Em construções antigas, devido a ações sísmicas, cargas excessivas ou até mesmo devido ao desgaste natural dos materiais devido à idade, é normal a ocorrência de fissuração. Normalmente, nas fissuras, a informação mais relevante sobre estas é a sua profundidade - se simplesmente é uma fissura superficial, se atravessa parte da alvenaria ou toda a espessura da alvenaria. Este tipo de avaliação pode ser feita através dos dados térmicos da superfície e do fluxo de ar que passa nesta. Grinzato et al [71], analisaram uma fissura através da termografia. Para isso, mediram a temperatura superficial da parede ao longo da fissura e o valor da temperatura do ar. Como o diferencial de temperatura entre ambos era de apenas 0,5°C e era constante ao longo da fissura, pode considerar-se que esta não atravessava o pano de alvenaria. Deste modo, pode perceber-se a gravidade da fissura e qual a urgência de uma intervenção nesta.

Um dos aspetos mais importantes de um edifício histórico é o estado das pinturas manuais que se realizaram, quer nas paredes, quer no teto. No período de realização das obras de arte, as paredes e tetos onde se realizavam possuíam uma base de gesso ou de argamassa. Existe a possibilidade desta base utilizada ter sido mal aplicada, formando assim bolsas de ar entre a referida base e a camada inferior. Isto também pode acontecer devido aos ciclos de cristalização dos sais que ocorrem ao longo dos anos [70]. Tem sido demonstrado um grande interesse no controlo das camadas de revestimento e, em especial, ao estado de aderência dos frescos, sendo muito comum os descolamentos ou a falta de aderência entre a superfície do acabamento e o substrato. A descontinuidade entre as duas camadas provoca uma barreira térmica detetável nos termogramas. A sua manifestação é semelhante à existência de bolsas de ar por trás dos azulejos, tal como descrito no subcapítulo 3.3. Tanto a análise qualitativa como a quantitativa são possíveis de serem realizadas de forma a detetar áreas soltas do reboco. Caso se

pretenda analisar através do método ativo, é necessário ter em atenção que, devido à geografia e topologia dos edifícios, nem sempre é possível utilizar fontes artificiais de calor. Isto deve-se ao facto de não se conseguir aquecer uniformemente as superfícies, ou então, a análise a realizar pode ser muito demorada. Este tipo de patologia é melhor observável no início do período de aquecimento da superfície, uma vez que a sua superfície aquece mais rapidamente que zonas correntes. Outra altura ideal é no início do período de arrefecimento, em que a superfície diminui a sua temperatura mais rapidamente. O uso de uma fonte artificial de calor ajuda a realçar os defeitos. O tempo que o defeito demora a aquecer ou a arrefecer depende da espessura e da profundidade da bolsa de ar.

Por último, mas não menos importante, surge a limpeza de superfícies e a reparação de argamassas. O uso de materiais impróprios para limpar as alvenarias de pedra influencia o comportamento térmico dos materiais, sendo visível nas inspeções termográficas. Existem materiais que se apresentam mais compatíveis com as propriedades físicas das pedras, enquanto que outros obstruem os poros, não permitindo que a pedra respire, armazenando assim dentro delas a humidade durante períodos de tempo mais alargados, podendo deteriorá-la. Com o uso da termografia, é possível perceber qual o tipo de material mais adequado à situação. O processo de restauração de argamassas também precisa ser bastante planeado em termos de modo de atuação. Os novos materiais introduzidos não podem ser apenas compatíveis com os originais em termos de cor e aparência, mas também em relação às propriedades físicas e químicas. Durante o século XIX, a introdução do cimento Portland, diminuiu a utilização do tradicional cimento de cal. Este uso frequente de argamassas de ligação de cimento em estruturas históricas tem causado problemas de compatibilidade com os materiais autênticos de uma estrutura histórica. Tal foi possível de analisar por Avdelidis e Moropoulou [68], através de inspeções termográficas, concluiu-se que o uso de argamassas de cimento provocam danos nas estruturas originais, isto porque o cimento é incompatível com pedras de calcário. Ao analisar a Figura 32 é possível ver que as argamassas à base de cal possuem temperaturas muito aproximadas com as temperaturas das pedras de calcário, enquanto que as argamassas de cimento possuem temperaturas muito mais elevadas do que as pedras. Existem então pedras com diferenciais de temperatura elevados dentro do mesmo elemento construtivo. Isto deve-se ao facto de a argamassa de cimento ser muito mais impermeável a soluções salinas e a sua porosidade ser diferente em relação às pedras.



Figura 32 – Distribuição irregular da temperatura provocado por uso de argamassa incompatível [68].

Como é assim possível concluir, apesar de muitas das anomalias localizadas em edifícios históricos se manifestarem do mesmo modo do que em edifícios habitacionais, o rigor de análise e do planeamento

necessário são muito maiores. Isto deve-se ao facto das características dos materiais utilizados e também devido a possíveis intervenções realizadas. A termografia de infravermelhos serve então como uma ponte de forma a entender melhor quais as soluções ótimas para cada situação e quais as áreas de intervenção mais urgentes. Assim, a termografia deve ser considerada um instrumento valioso para a preservação e proteção do património cultural.

4

INTEGRAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS NAS NOVAS TECNOLOGIAS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos foram significativamente grandes e, na termografia, são bastante notórios nas câmaras termográficas. É possível observar-se que, além das câmaras terem uma qualidade de imagem muito superior às iniciais, têm mais funções, a capacidade de captar a temperatura de pontos é maior e são mais compactas. Existem câmaras que cabem no bolso e acessórios que permitem utilizar o telemóvel para capturar termogramas. O facto de as câmaras serem mais pequenas permite utilizar a termografia em conjunto com outras tecnologias como, por exemplo, drones e, assim, ter um uso mais abrangente na construção civil e noutras áreas.

Os avanços não se deram apenas ao nível de equipamentos, mas também ao nível do software utilizado. Apesar de ainda serem utilizados softwares como Computer Aided Design (CAD), que apenas permitem representar linhas, os softwares de Building Information Modeling (BIM) também percorreram um grande caminho desde a sua invenção até aos dias de hoje. Com este último, é possível fazer modelos 3D à escala, incluindo propriedades físicas e térmicas na descrição dos elementos. Estes modelos 3D podem ser vistos em Realidade Virtual (R.V) e fornecer uma ideia realista da dimensão dos espaços que serão construídos em obra.

Quando se incorporam as tecnologias referidas anteriormente com a termografia de infravermelhos, é possível perceber que existem grandes vantagens que permitem obter modelos ricos em informação, quer do interior do edifício, quer da sua envolvente. Através do auxílio destes modelos é possível identificar quais as zonas mais críticas do edifício e planear futuras intervenções.

4.2 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS E DRONES

4.2.1 O QUE SÃO OS DRONES?

Os drones, também conhecidos por *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), são aeronaves que se podem movimentar segundo três eixos (x, y e z). Os drones são uma das componentes dos *Unmanned Aerial Systems* (UAS). Os outros componentes são o Centro de Controlo Terrestre ou *Ground Control Unit* (GCU) e um sistema de comunicações entre os dois. Estas naves, como o próprio nome diz, não necessitam de um piloto. Em vez disso, são controladas por controlo remoto, ou então, o seu percurso pode ser programado previamente, não necessitando de um utilizador presente ao longo do percurso. Os custos associados à utilização de drones são menores em relação às aeronaves em que é necessário um piloto, tornando assim viável a sua utilização para estudos que até outrora seriam demasiado dispendiosos [72]. No entanto, é recomendado que o utilizador tenha algum tipo de formação para que não cause estragos ou ponha em risco a segurança de quem se encontre nas proximidades.

Inicialmente, foi desenvolvido para fins militares, contudo, recentemente, o uso civil tem aumentado devido ao seu preço ser muito mais acessível. Os seus usos podem ser extremamente variados. Pode ser usado simplesmente como um passatempo, mas também, por motivos profissionais, tais como fotografia, ou até mesmo em operações de resgate. Os drones podem ter vários tipos de classificação, variando desde peso, capacidade de carga, tempo de voo, alcance, a envergadura das asas e o tipo de missão [73]. Para o objetivo de inspeção de edifícios, os veículos classificados como micro-drones (peso entre 200 gramas e 2 kg) ou mini drones (peso entre 2 kg e 20 kg) são suficientes.

As câmaras termográficas utilizadas também sofreram uma redução custo e tamanho e um aumento de qualidade, possibilitando assim novas formas de serem utilizadas. A combinação dos UAV's com as câmaras termográficas tem sido um ponto de interesse que se revela promissor no sector construtivo. Na Figura 33 encontra-se um exemplo de um drone e de uma câmara utilizados para realizar inspeções termográficas aéreas.



Figura 33 – Equipamentos normalmente utilizados para inspeções termográficas aéreas: a) Drone DJI Phantom 2; b) Câmara termográfica FLIR VUE PRO [74, 75].

4.2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE DRONES

Os drones que permitem acoplar uma câmara são fáceis de transportar e simples de operar. Estes permitem analisar pequenas ou grandes áreas, que normalmente demorariam muito tempo, ou então, observar zonas inacessíveis ou de difícil acesso, como os telhados. A grande vantagem em relação a helicópteros é que estes apenas permitem uma visão vertical sobre os edifícios em estudo, não garantindo assim a análise detalhada de uma fachada. Os primeiros estudos aéreos termográficos tinham custos de várias dezenas de milhares de euros. Além de, na altura, ser uma tecnologia recente, eram necessários equipamentos especiais que permitissem o transporte da câmara termográfica na aeronave. Atualmente, pode comprar-se drones por poucas centenas de euros já com os suportes próprios para as câmaras [47].

Áreas como a arqueologia podem beneficiar bastante desta união pois é possível observar as temperaturas do solo e encontrar anomalias no terreno, o que permite descobrir elementos (de interesse histórico) no subsolo. Estes vão absorver ou emitir energia infravermelha de acordo com as suas propriedades físicas que se distinguem do solo. Já foi realizado um trabalho para averiguar a sua aplicabilidade na descoberta de túneis e outras estruturas históricas subterrâneas, com o intuito de descobrir quais as zonas que seriam futuros pontos de escavação. O resultado obtido foi positivo, no entanto, a sua eficácia é dependente da quantidade de análises feitas ao local em dias diferentes, visto que certos elementos foram detetados num dia específico e em outros dias não, mostrando assim que este tipo de ensaio é muito dependente das condições meteorológicas [47].

Antes de fazer voos de análise termográfica da área em estudo, deve realizar-se um voo com uma câmara fotográfica acoplada no drone para realizar ortofotografias do local. Devido à alta resolução das imagens, e através da definição de pontos de referência durante a sua captação, é possível fazer a sua sobreposição, criando assim um ortofotomapa. Este voo inicial, além do ortofotomapa, tem como objetivo verificar se não existem objetos que possam fazer reflexão na câmara termográfica e influenciar os resultados. Depois de verificado que não existe nenhum impedimento, pode começar-se a captação das imagens termográficas. A câmara de infravermelhos pode ser programada para que capte imagens em intervalos de tempo que devem ser definidos tendo em atenção as propriedades da câmara (resolução e ângulo de abertura). As imagens captadas durante o voo precisam então de ser sobrepostas de forma a que seja possível obter uma planta termográfica da área em estudo. Devido à baixa resolução das câmaras de infravermelhos em comparação com as câmaras normais, é difícil fazer este tipo de tratamento de forma manual. Existem algoritmos desenvolvidos que permitem fazer uma parte do processo automaticamente, sendo parte do tratamento de imagem feito de forma manual [76]. Com o recurso a programas como o *ArqGis*, é possível fazer a sobreposição das imagens termográficas com as fotografias (Figura 34).

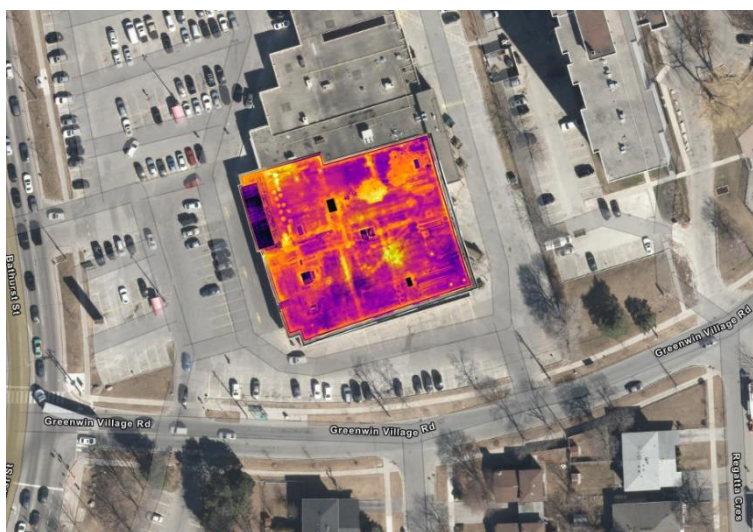


Figura 34 - Sobreposição de imagem termográfica em ArqGis [77].

Apesar da utilização de drones associados às câmaras termográficas ser muito prática, é necessário ter em conta alguns pontos negativos. Primeiramente, o facto de o tempo de bateria do drone ser relativamente curto (aproximadamente 20 minutos) [78]. Isto obriga a fazer vários voos caso a área a cobrir seja demasiado grande, o que, por sua vez, dificulta o processo de junção de imagens. Além disto, como foi explicado no capítulo 2, a termografia é altamente dependente de diversos parâmetros, tais como a emissividade e o ângulo da câmara com a superfície, sendo este último, um fator a ter especial atenção para se obter resultados confiáveis [57].

4.2.3 EMPREGABILIDADE DA TERMOGRAFIA COM DRONES EM DIFERENTES ÁREAS

Como mencionado previamente, a redução dos custos dos equipamentos, quer de drones, quer de câmaras de infravermelhos, permitiram que fossem realizados estudos nas mais diversas áreas. Uma das situações em que o uso desta combinação se revelou eficaz foi na inspeção de Centrais Fotovoltaicas [79-82]. O lucro/produção de energia está totalmente dependente do correto funcionamento dos Painéis Fotovoltaicos (PV) e, quanto mais tarde for descoberta qual a anomalia, maior é a perda. Caso o painel não esteja a funcionar de forma correta, ocorrem correntes elétricas anormais, traduzindo-se numa zona anómala de temperatura, sendo detetável através de câmaras TIR. No entanto, devido às centrais PV terem dimensões elevadas (vários hectares) e um grande número de painéis, torna-se irrealista e inconveniente analisar os painéis com a câmara de forma manual [80]. A incorporação de drones possibilita utilizar a termografia de infravermelhos para analisar vários painéis de uma só vez tal como demonstrado por Pinceti et al [82] (Figura 35). Neste estudo, foi possível analisar grandes áreas de painéis e encontrar alguns defeituosos, com delta T de 39,2 a 59,2 em relação ao resto do painel. Os defeitos encontrados eram de diferentes naturezas, permitindo assim ver quais os efeitos térmicos provocados por cada um. Através de análises da perda de energia e do custo que cada falha representa para a empresa, foi possível chegar à conclusão se a manutenção dos painéis compensaria ou não.

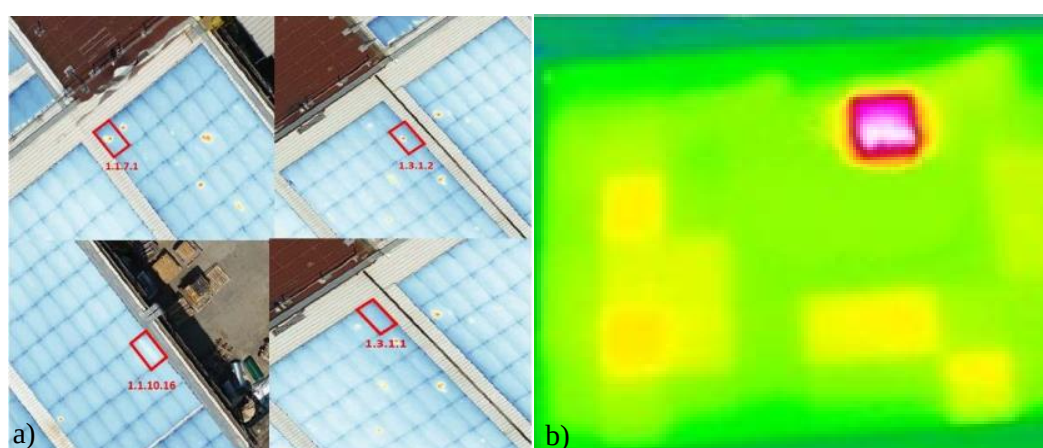


Figura 35 – a) zonas de temperatura anómala em painéis fotovoltaicos; b) Inspeção aproximada de um painel defeituoso [82].

Este trabalho é bastante relevante para a área da engenharia civil devido à obrigatoriedade da adoção de Sistemas Solares Térmicos (SST) segundo o Decreto Lei 118/2013. Neste DL, é dito que, em edificações novas, é necessário a adoção de Sistemas Solares Térmicos destinados a Águas Quentes Sanitárias (AQS). Apesar do funcionamento dos PV's não ser igual aos SST, a realização de estudos do comportamento do último, pode ajudar a estabelecer padrões que viabilizem este tipo de inspeções. Em edifícios multifamiliares de grandes dimensões, é necessária uma área relativamente grande de painéis solares que, para terem melhor eficiência, se localizam na zona mais alta, ou seja, na cobertura. A sua inspeção pode ser perigosa e demorada, no entanto, o uso de drones pode facilitar a sua manutenção.

É possível observar a versatilidade da combinação das duas tecnologias no estudo realizado por Lega et al [83]. Neste trabalho foi desenvolvido um método para detetar despejos ilegais em rios e no mar através de termografia. Devido à eficácia deste procedimento, este foi depois adotado pela guarda costeira italiana. O método utilizado neste trabalho foi desenvolvido devido à ineficiência das técnicas usadas para detetar atividades ilícitas marítimas, acima referidas. Por exemplo, o despejo de hidrocarbonetos em rios e oceanos através de tubos profundos é difícil de observar e detetar. É também difícil de encontrar a fonte do despejo quando este é realizado numa zona a montante da foz do rio ou das margens dos oceanos. Ao longo do estudo, realizaram-se 3 voos a diferentes altitudes com o intuito de se analisar as diferenças entre as imagens térmicas obtidas (Figura 36). Os três voos realizados foram:

1. Um voo inicial de alta altitude de avião;
2. Um voo a altitude media de helicóptero;
3. Um voo de baixa altitude com um drone.

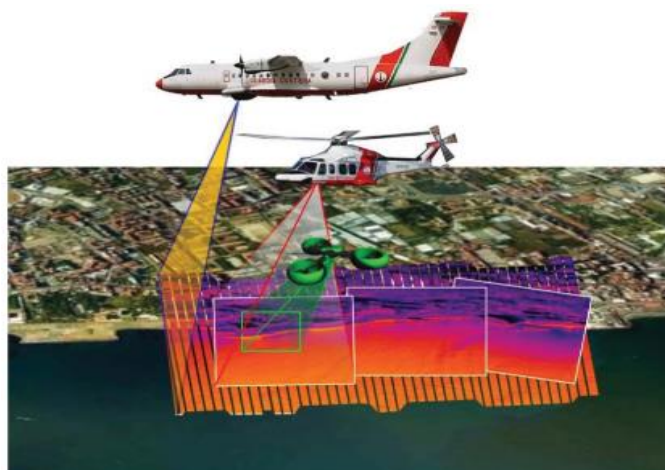


Figura 36 - Voos realizados para a inspeção de poluentes utilizando a termografia [83].

Como era expectável, à medida que a altura de voo diminui, a resolução de imagem dos termogramas obtidos aumentou. O que foi surpreendente foi o facto de o aumento de resolução ter revelado micro anomalias ambientais. Entre estas, foi possível encontrar anomalias como uma zona de mistura de poluentes e uma zona de descarga ilegal de esgotos de um navio. O capitão do navio tentou esconder a descarga derramando os resíduos numa zona de descarga de uma estação de tratamento de águas. Detetou-se também uma zona à superfície do mar onde a temperatura superficial sofreu uma mudança entre dois locais adjacentes de 5°C. Esta última observação é muito improvável. Pode ser explicada por uma diferença de emissividade caso haja uma alteração da composição química devido a um poluente. Apesar deste último estudo ser um estudo mais complexo e mais caro dos que são expectáveis para a inspeção de edifícios, demonstra a versatilidade e as possibilidades das inspeções termográficas.

A agricultura é responsável por cerca de 85% do consumo de água mundial [84], e sendo os recursos hídricos limitados especialmente em climas áridos, torna-se necessária a criação de medidas precisas de controlo de água com o intuito de otimizar o seu uso [85]. A quantidade de água necessária para cada tipo de plantação deve ser estimada de forma a não haver desperdício de água, não fornecendo mais do que o necessário, ou então, limitando demasiado a quantidade fornecida, o que pode afetar a produção. O uso da termografia com drones permitiu sobrevoar as plantações e criar um mapa termográfico. Através deste mapa termográfico, foi possível estudar quais as plantas que estavam a ser afetadas por um défice de água, quer por falta de irrigação, quer por o seu ritmo de transpiração ser mais elevado. Em Gonzalez-Dugo et al. [85] verificou-se que o ritmo de transpiração variava dentro da mesma espécie em função da idade da planta. Os autores observaram que as folhas mais jovens apresentavam uma taxa de transpiração 280% mais elevada do que as folhas mais velhas, que se traduzia nos termogramas como uma diminuição de temperatura de cerca de 1°C. Os mesmos autores verificaram ainda que a taxa de transpiração também variava em função da altura do ano (no Verão era 25% maior do que na Primavera). Assim, concluíram que a termografia poderá ajudar o setor agrícola a melhorar a longevidade e a produção das colheitas, otimizando, ao mesmo tempo, o consumo de água.

Uma inspeção termográfica aérea permite, então, cobrir uma área maior de plantas e árvores, tornando assim prático o seu uso em grandes plantações. Contudo, devido ao padrão repetitivo e com poucos pontos de referência, torna-se difícil realizar o mapeamento aéreo de toda a plantação. A dificuldade de obter pontos de referência também se deve ao facto de as câmaras termográficas terem uma resolução

de imagem muito baixa (320x240 pixéis até 640x512 pixéis). No caso de câmaras térmicas que tenham integrado uma câmara RGB, que capte ao mesmo tempo o termograma e fotografia digital, é possível realizar o mapeamento através das fotografias digitais [86]. No entanto, nem todas as câmaras possuem esta funcionalidade e o disparo simultâneo da fotografia e do termograma nem sempre é viável. A isto, junta-se o facto do tempo de voo dos drones ser relativamente curto que, tal como referido anteriormente, para grandes áreas, obriga a realizar vários voos de forma a captar toda a área analisada. Deve-se então, planear previamente o percurso a ser feito ao longo das viagens de forma a manter a coerência entre imagens captadas (Figura 37).



Figura 37 – Comparação entre o percurso planeado a ser realizado (Linhas retilíneas) e o percurso realizado (Linhas onduladas) [86].

Durante os voos realizados na análise de grandes áreas, não é invulgar prolongarem-se por períodos de tempo superiores a 45 minutos. Neste período de tempo, é expectável que se alterem as condições atmosféricas (velocidade do vento, sombreamento provocado por nuvens e a temperatura do ar), o que influencia a temperatura superficial analisada [86]. Apesar disso, o setor agrícola pode beneficiar da implementação de UAV's de forma a melhorar o conhecimento do solo, plantas e sustentabilidade económica e ambiental.

Por último, é relevante referir o trabalho realizado por Abram [87]. Neste estudo foi utilizado um drone com uma câmara termográfica de forma a detetar entradas de ar na tubagem de gás entre a caldeira e um precipitador eletrostático de uma fábrica de celulose. Os gases de combustão das caldeiras são direccionados por tubos com isolamento térmico até ao precipitador, local este onde se obtém um retorno de 99,9% de partículas poluentes, enviando assim gás limpo para a atmosfera. A entrada de ar nos tubos reduz a temperatura dos gases, aumentando a humidade e a ocorrência de corrosão dentro do precipitador. Com o uso da termografia foi possível encontrar locais de entradas de ar que afetavam o processo. O facto de se saber a localização do defeito permitiu atuar rapidamente no local necessário, reduzindo assim o tempo que foi preciso manter desligada a produção. Durante toda a inspeção dos tubos de gás, que tinham uma altura até 60 metros, nenhum dos inspetores foi exposto a uma altura superior a 2 metros. Isto demonstra a redução de perigos durante a inspeção bem como a redução de gastos económicos operacionais e temporais.

4.2.4 UTILIZAÇÃO DE DRONES E TERMOGRAFIA NO SECTOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Tendo sido mostrado várias utilizações da fusão entre as duas tecnologias, neste capítulo discutir-se-á a sua aplicação no sector da construção civil. Tal como já foi referido, a duração das baterias dos drones é relativamente baixa. Por isso, é sempre necessário planear previamente qual o trajeto de voo a ser realizado quando se analisa a envolvente de um edifício, de forma a que este seja o mais rápido e eficiente possível (Figura 38). É aconselhável que o voo comece num canto de uma das fachadas e, após a descolagem, que as imagens sejam obtidas entre os dois limites verticais da superfície. Para reduzir o efeito da baixa qualidade dos termogramas e tornar mais simples o mapeamento da superfície, de forma a ser possível modelar a estrutura em CAD 3D, os termogramas devem sobrepor-se entre 70% a 80% [88]. Voos realizados em círculos elípticos a diferentes alturas com uma sobreposição de 90% a 95% também podem ser realizados para gerar modelos 3D. Independentemente do plano de voo escolhido, deve sempre ter-se em conta a presença de obstáculos, como linhas de alta tensão, árvores e outros edifícios, o que pode impossibilitar a análise de uma ou mais envolventes. Nestes casos, é necessário reformular o plano de voo ou então proceder a uma análise de forma manual. O ângulo da câmara com a superfície deve ser analisado individualmente para cada caso específico de forma a reduzir a influência de reflexões. Outros fatores que influenciam os termogramas, tais como a distância do drone à superfície em estudo, a hora do dia, o local, as condições atmosféricas, sombreamento e a superfície analisada, também devem ser tidos em conta. A altura do dia é importante na análise de forma a não obter falsos positivos nos termogramas [51, 79, 86, 88, 89]. Apesar de ser possível programar o percurso a ser realizado pelo equipamento, é aconselhável ter dois operadores no solo - um para controlar o percurso do drone e outro para controlar a câmara. Assim, é possível fazer pequenos ajustes ou detetar zonas com erros em imagens captadas, que devem ser analisadas com maior detalhe.

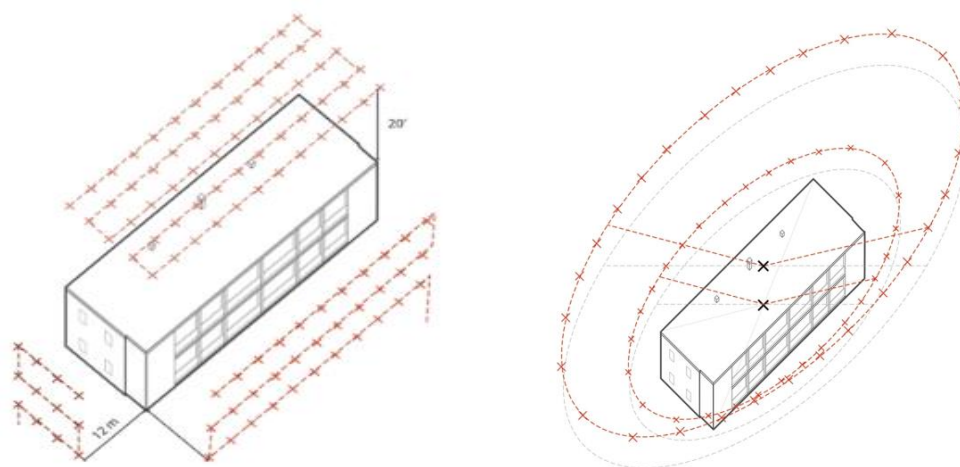


Figura 38 – Trajetos aconselháveis a realizar durante uma inspeção termográfica a um edifício com auxílio de UAV [89].

A emissividade é uma característica importante a ser definida de forma a obter os valores corretos de temperatura superficial da envolvente. No entanto, raramente a fachada de um edifício é homogénea, o que leva a estabelecer um valor de emissividade tendo em conta os valores tabelados dos materiais em estudo. A escolha deste valor tabelado influencia os resultados, fazendo com que a temperatura superficial obtida seja ligeiramente diferente da real. Contudo, estes valores podem ser modificados

durante o voo quando necessário ou, então, após o voo durante a análise das imagens, de forma a assegurar leituras precisas [89].

Dos dois métodos de termografia referidos anteriormente no subcapítulo 2.4 (ativa e passiva), a termografia ativa é a mais difícil de aplicar in situ, porque necessita de condições ambientais controladas [57]. A análise termográfica com drones fica, de certa forma, restrita a uma análise passiva da envolvente [89]. Apesar de usar a termografia passiva, a análise da envolvente pode ser qualitativa ou quantitativa. A análise qualitativa é ideal para fazer uma primeira avaliação da envolvente e encontrar quais os defeitos mais evidentes e graves. Os defeitos que podem ser analisados de forma qualitativa com drones são:

- Pontes térmicas - As pontes térmicas são locais onde a resistência térmica na envolvente do edifício se altera significativamente em relação à zona corrente. Como existe uma alteração da resistência térmica, a transferência de calor neste ponto será diferente dos outros pontos sendo possível a observação de alterações da temperatura nos termogramas. Normalmente, as pontes térmicas ocorrem, por exemplo, em zonas de ligação da cobertura com a parede, de paredes e do piso com a parede;
- Humidade – A humidade pode ocorrer devido a vários motivos. Dois dos mais recorrentes são as infiltrações, que podem ocorrer em zonas onde existam fissuras na fachada, e humidades ascensionais. Nos termogramas, é possível detetar-se humidade em zonas onde a temperatura superficial é menor do que a zona corrente. A humidade pode também ser detetada em materiais no interior que se encontrem molhados, por este motivo, tem menor resistência térmica e maior calor específico.
- Falhas de isolamento térmico – É possível analisar através de termogramas se existem falhas no isolamento térmico do edifício. Existe, também, a possibilidade de o isolamento térmico se degradar até a um ponto em que deixa de cumprir a função pretendida. Normalmente, estas zonas são observáveis através de uma inspeção exterior como zonas mais frias durante o Verão ou mais quentes durante o Inverno. É expectável que, em locais onde o isolamento se encontra intacto, o seu comportamento térmico seja uniforme.
- Destacamentos/Delaminação – Este tipo de anomalia é observável através de um aumento de temperatura provocada pela existência de uma “bolsa” de ar localizado sob o revestimento. Pode ocorrer em revestimentos cerâmicos ou rebocos. É possível observar os destacamentos como zonas mais quentes durante o período de aquecimento e mais frias no início do sombreamento.

Após este primeiro voo para se encontrar estes defeitos, pode ser feito um segundo voo com o intuito de fazer uma análise quantitativa. Neste segundo voo, é necessário ter mais rigor nos parâmetros estabelecidos de forma a obter valores reais de temperatura superficial. A análise quantitativa é ideal para determinar a importância/magnitude dos defeitos.

Existem softwares que permitem fazer a deteção automática de anomalias em termogramas, no entanto, são suscetíveis a erros [88]. Esta deteção consiste na análise linear pixel a pixel que, quando ocorre repentinamente um diferencial de temperatura, maior do que o estabelecido previamente, é sinalizada uma anomalia térmica. Estas diferenças de temperatura repentinas podem acontecer devido a mudanças de materiais com propriedades diferentes o que faz com que gere um falso positivo. Por motivos como este, deve ser sempre feita uma análise por um operador experiente.

É usual que os UAV's utilizados em inspeções termográficas possuam um suporte para câmara RGB e térmica e também um sistema integrado de *Global Positioning System* (GPS). O sistema de GPS permite catalogar e programar os voos realizados, ou então, encontrar o aparelho caso se perca a conexão ou este se despenhe. No entanto, este sistema também pode ser utilizado com o intuito de georreferenciar as imagens obtidas pelas câmaras transportadas. O objetivo da obtenção de fotos georreferenciadas é de conseguir utilizar técnicas de fotogrametria de forma a criar um modelo realista e à escala. Devido à baixa qualidade de imagem das câmaras termográficas e à grande quantidade de ruído que existe nos termogramas, são utilizadas as imagens RGB que, devido a terem melhor qualidade de imagem, permitem aos softwares de modelagem criar uma nuvem de pontos 3D da envolvente do edifício. Softwares como o *Pix4D*, *Agisoft Photoscan* ou o *DroneDeploy*, permitem extrair os pixels das imagens 2D através de triangulação e localiza-los individualmente dentro da nuvem de pontos no modelo (Figura 39 a)). Imagens que sejam de má qualidade são automaticamente descartadas. No fim, são fornecidos vários modelos finais e cabe ao utilizador selecionar fotos que não tenham sido calibradas corretamente para assim as descartar também. Após ser criado o modelo 3D do edifício analisado, as imagens térmicas são sobrepostas por cima deste (Figura 39 b)). Os termogramas também se encontram georreferenciados e, tendo sido capturados no mesmo local que as imagens RGB, a sua sobreposição é simples. O modelo final utilizado pode ser tratado em outros softwares CAD e de modelagem 3D. [88, 89]. Este modelo pode, também, ser trabalhado e impresso através de uma impressora 3D [89], permitindo, assim, utilizá-lo como maquete de forma a planear futuras intervenções pela equipa responsável pela manutenção e reabilitação.

Tal como observado por Rakha e Gorodetsky [89], a qualidade do modelo 3D obtido é dependente do software utilizado. Num estudo realizado por aqueles autores, analisou-se o resultado final entre 3 softwares e foi possível verificar que certos softwares são mais rápidos a formar a nuvem de pontos, enquanto que outros produzem modelos com melhor qualidade. Certas anomalias, como presença de água nos elementos construtivos, foram mais evidentes utilizando determinados softwares. Isto demonstra que a qualidade final do modelo e as anomalias observáveis variam em função do software utilizado e deve ter-se em conta este tipo de fatores ao realizar este tipo de procedimento.

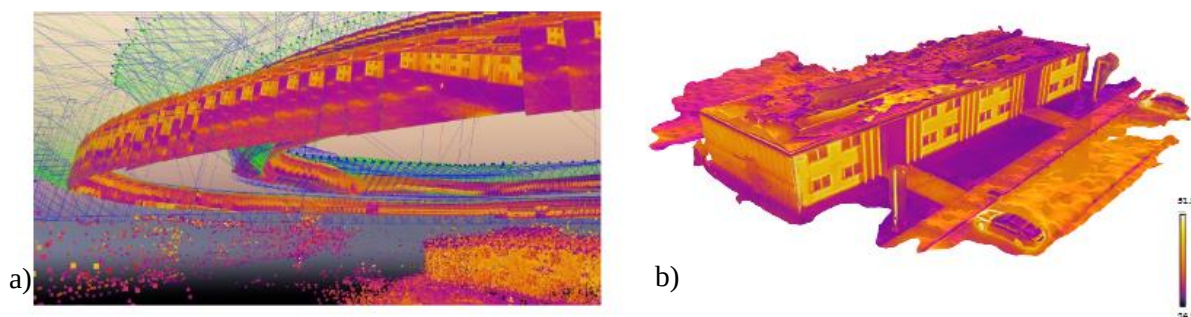


Figura 39 – a) Processamento de imagens 2D; b) Representação 3D final dos termogramas [88].

Por último, determinadas, assim, as zonas dos defeitos, pode ser feito um estudo do seu impacto na eficiência energética do edifício. Mediante o orçamento disponível, é possível realizar as intervenções para as suas correções.

Pode, assim, concluir-se que as inspeções termográficas automatizadas de edifícios com auxílio de UAV's são divididas em três fases. Primeiramente, uma inspeção pré-voo da área envolvente de forma

a ver potenciais obstáculos e definir o melhor percurso de a ser realizado. Segundo, realização do voo de forma a adquirir imagens térmicas e RGB. Por último, com recurso a softwares, realiza-se a construção do modelo através das fotografias RGB e de seguida das imagens térmicas [89, 90]. Caso seja necessário, pode ser realizado um quarto passo na eventualidade de se pretender realizar um voo adicional, que tem como objetivo analisar patologias de forma mais rigorosa para possíveis inspeções quantitativas.

4.3 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS E BIM

4.3.1 O QUE É BIM?

Na indústria da construção, é usual as grandes obras ultrapassarem o orçamento e o prazo estipulado inicialmente. Isto levou as empresas a pensarem numa forma alternativa de planejar a construção e execução de edifícios. Desta forma, surge o BIM que, segundo Gu e London [91], se trata de um processo informático que permite armazenar digitalmente toda a informação de um edifício no seu modelo 3D, ao longo do seu ciclo de vida. Isto permite analisar quais as zonas de pior desempenho e atuar sobre elas. Estes dados podem ser informação geométrica ou não geométrica. No entanto, apesar dos benefícios da aplicação da tecnologia serem evidentes, a sua adesão ainda é pequena. Fatores como a falta de experiência e os projetos terem um carácter fragmentado explicam esta demora na sua total implementação. A grande diferença entre BIM e CAD é que, quando se faz a alteração de uma vista num modelo BIM, esse objeto é modificado em todas as outras vistas. Portanto, num modelo CAD é necessário verificar todas as outras vistas e atualizá-las de forma individual. No BIM, é também possível inserir informação sobre os elementos constituintes do edifício, desde os componentes às propriedades térmicas. Existem vários níveis de BIM que aumentam o nível de complexidade e detalhe do modelo. Os níveis são: 3D (Geometria); 4D (Tempo); 5D (Custo); 6D (Gestão de Instalações); 7D (Sustentabilidade); 8D (Segurança) [92].

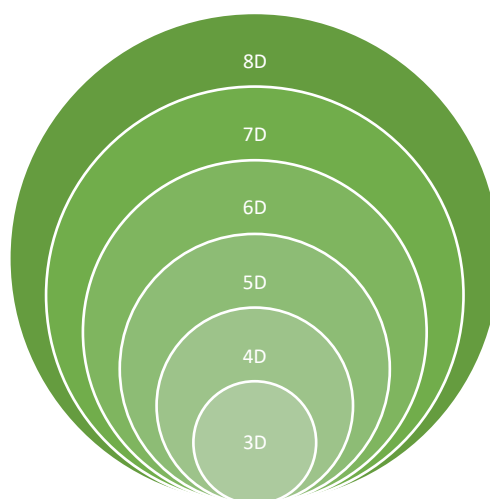


Figura 40 - Níveis BIM e crescente complexidade

Em softwares CAD, devido a serem representações 2D, é normal que aconteçam erros de sobreposição de elementos entre especialidades diferentes. Estes erros são mais fáceis de detetar e de corrigir em softwares BIM onde as representações são feitas em 3D [33]. O facto de o modelo criado ser em 3D, torna possível a transição do mesmo para programas de Realidade Virtual, o que permite ter uma noção

mais realista das dimensões e detetar erros mais facilmente. Este assunto será abordado no subcapítulo 4.4.

4.3.2 OBTENÇÃO DE MODELOS 3D

A redução do consumo de energia e um aumento da eficiência energética em edifícios é um dos objetivos principais do sector construtivo. Num país, as habitações correspondem entre 20% a 40% do consumo de energia [59, 66, 93]. Na fase de conceção do projeto, a criação de um modelo 3D permite realizar vários de tipos de simulações que testam o comportamento do edifício, contudo, dentro do foco desta dissertação, apenas se analisou a utilização de modelos BIM para simulações térmicas e energéticas. O problema é que, caso se queira fazer um modelo para a simulação energética de um edifício já existente, não se pode criar o modelo a partir das plantas pois, podem existir erros ou emissões. Nestes casos, é possível recorrer ao uso do *Laser Scanning* (Figura 41).

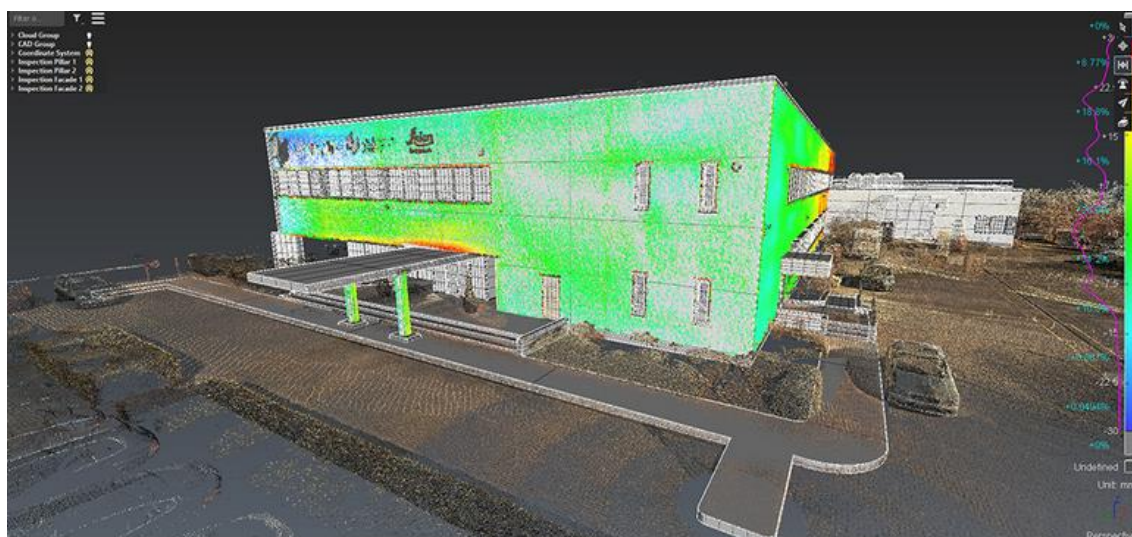


Figura 41 - Exemplo de obtenção de nuvem de pontos através de equipamento Laser Scanner [94].

O *Laser Scanning* (LS) é uma tecnologia que permite analisar e digitalizar objetos e elementos do mundo real e criar representações 3D dos mesmos. Com o LS é possível fazer o levantamento de um terreno, edifícios e elementos da envolvente com bastante precisão, detalhe e poucos erros. Uma grande vantagem de obter o modelo *as-built* é que torna possível analisar as patologias existentes que são visíveis, pois o LS também as representa na nuvem de pontos com elevada precisão. A máquina cria uma nuvem de pontos rodando sobre si mesma e disparando um laser que mede a distância entre ela própria e a projeção (capaz de medir mais de um milhão de pontos por segundo). A grande desvantagem na sua utilização é que os custos de hardware são demasiado elevados. Outra desvantagem do LS é o facto de as imagens obtidas normalmente necessitarem de um pós-processamento e, por este motivo, é necessário que o utilizador tenha formação especializada [95].

Os autores Lagüela et al. [96] apresentam um exemplo prático do uso do LS. O objetivo principal deste estudo foi apresentar uma metodologia para gerar modelos 3D com texturas e, ainda, adicionar imagens RGB e termogramas. Com esta informação, era possível fazer um plano desde a análise e diagnóstico até à decisão sobre quais as zonas a serem intervencionadas. Obteve-se a nuvem de pontos da zona exterior de um pequeno edifício de geometria simples com dois tipos de construção diferente (tijolo e

chapa metálica). Foram também tiradas fotos RGB na mesma posição onde se encontrava o laser scanner. Quer a nuvem de pontos, quer as imagens RGB foram processadas com o software *RiScan Pro*. Tiraram-se vários termogramas da fachada do edifício, embora nem sempre da mesma posição do LS. Na Figura 42 a), pode ver-se, de forma esquemática, os passos da metodologia proposta. Após a criação do modelo, foi possível geolocalizar o mesmo no *Google Earth* e adicionar essa planta, dando assim uma visão geral da sua envolvente (Figura 42b)). Apesar do processo ser praticamente todo automático, ainda foi necessário a intervenção do utilizador na organização da nuvem de pontos no software para definir qual a parede principal e qual a ordem dos pontos que definia cada superfície. Este foi a maior desvantagem deste método de trabalho pois, no caso de grandes edifícios, seria necessário manter a coerência para que não existissem incoerências na geometria do modelo.

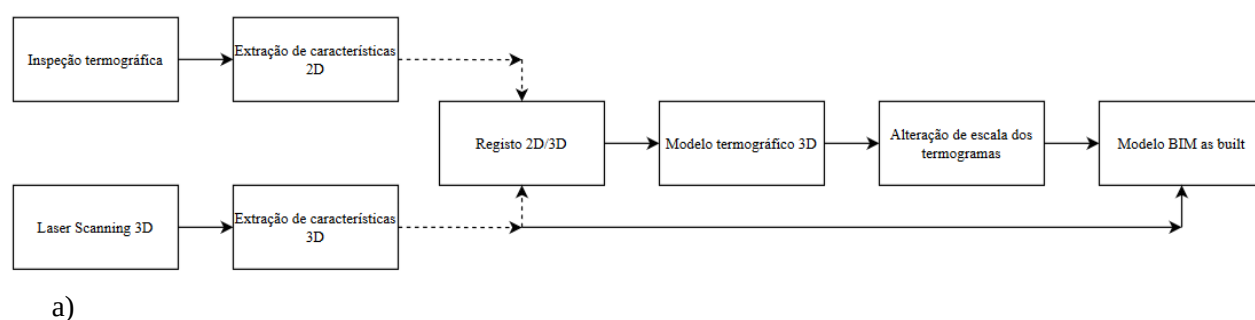


Figura 42 – a) Metodologia utilizada para fusão de imagem; b) Modelo BIM final com texturas [96].

Apesar de neste trabalho apenas ter sido feita a sobreposição na parte exterior do edifício, é também esperado que se utilize o *laser-scanning* no interior do mesmo. Assim, é possível criar todo um modelo termográfico e geometricamente correto quer do interior, quer do exterior do edifício existente. Com a evolução de novas tecnologias, é de esperar que metodologias como a definida anteriormente sejam mais fáceis e automáticas de se realizar. Assim, será possível fazer o modelo *as-built* de edifícios de vários pisos, onde seja possível detetar quais as zonas que precisam de ser tratadas e corrigidas.

4.3.3 INTEGRAÇÃO DE TERMOGRAFIA EM MODELOS BIM

Apesar das vantagens da utilização da termografia, esta apenas é capaz de produzir imagens 2D com resolução relativamente baixa. Isto leva a que os termogramas obtidos causem, para utilizadores menos experientes, uma dificuldade em perceber a tri-dimensionalidade do edifício devido à falta de geometria e volume [33, 97-99]. Situações como esta podem ser resolvidas inserindo os dados termográficos em modelos BIM do caso em estudo.

É possível adicionar termogramas aos modelos, sendo estes adicionados às geometrias como uma textura. Softwares como o *SketchUp* permitem este tipo de funcionalidade que, apesar de ser um processo simples em paredes planas, para paredes curvas é aconselhável o uso de outro software de modelação. A captura de vários termogramas da envolvente permitem analisar várias superfícies, não sendo a sua visualização limitada pelo ângulo da câmara, tornando assim o modelo 3D mais simples de entender [97]. De forma a obter uma “coerência” entre os vários termogramas captados da envolvente, é aconselhável fixar uma escala de temperatura. Assim, é mais fácil de fazer a correspondência entre as cores e as temperaturas superficiais. É, também, necessário ter em conta a distorção dos termogramas devido à perspectiva da câmara, sendo ideal tentar analisar, sempre que possível, de frente para o elemento desejado.

Ao inserir no modelo as propriedades térmicas dos elementos construtivos, é possível torná-lo mais rico em informação e aumentar os seus possíveis usos, nomeadamente para a realização de simulações energéticas. Para efetuar simulações energéticas, deverá conhecer-se, entre outros parâmetros, o valor do coeficiente de transmissão térmica, U [33, 61, 63, 65, 100].

Tal como referido no subcapítulo 3.8, o valor do U pode ser calculado de duas formas. A primeira através do método de cálculo que consiste em valores tabelados considerando que são conhecidas as espessuras e a composição exata dos constituintes dos elementos construtivos. Este método não é o mais indicado para edifícios mais antigos pois não tem em conta o envelhecimento de materiais e, em certos casos, nem existe a informação sobre a construção. O segundo método consiste na utilização de um fluxímetro (HFM) que apenas permite a medição num ponto específico. Também a termografia já foi empregue para medir este valor, tendo obtido valores dentro de intervalos aceitáveis. Este tipo de ensaio é ideal, pois é um ensaio não destrutivo e permite medir o valor de U ao longo de todo o elemento construtivo. Ao obter o valor de U , é possível determinar o estado do edifício *as-built*. Como é expectável, neste tipo de ensaios, é necessária uma análise quantitativa bastante rigorosa de forma a obter os valores próximos da realidade.

Os autores Laguela et al [101] realizaram um estudo de um pequeno edifício em que o modelo BIM já existia [96]. O objetivo deste artigo foi o de calcular o valor de U do edifício e adicioná-lo ao modelo BIM de forma a que fosse possível realizar uma simulação energética. A medição foi efetuada assumindo que a transferência de calor através da parede era devida ao fluxo de calor por condução, enquanto que a transferência de calor da parte interior da parede para a câmara termográfica combina fluxos convectivos e radiativos. Neste estudo o erro obtido no cálculo do U foi de 5,79%. Contudo, como já se observou em 3.8, erros abaixo de 10% são considerados desprezáveis no cálculo da simulação energética. Os valores U finais foram introduzidos no BIM como dados descritivos associados ao tipo de elemento construtivo, de modo a que o modelo estivesse termicamente caracterizado.

De forma a reabilitar ineficiências energéticas, pode ser insuficiente fornecer apenas um termograma em um determinado momento no tempo. A captura de termogramas da mesma divisão ao longo do dia permite a geração de modelos 4D, que possibilita a análise da evolução da temperatura superficial ao longo do tempo. Assim, os dados termográficos e geométricos e as visualizações geradas a partir de um modelo termográfico 4D fornecem informação quantitativa e qualitativa útil para apoiar o diagnóstico energético dos edifícios e avaliação do conforto térmico. Deste modo, é possível ajudar os intervenientes a tomar as melhores opções para a melhoria da eficiência energética. Ao captar vários termogramas ao longo do tempo, é possível analisar qual o comportamento e a interação do elemento em estudo com aqueles que se encontram em contacto com o mesmo (Figura 43) [33]. É necessário controlar a temperatura média radiante de forma a manter o conforto. Esta pode ser calculada com base na temperatura das superfícies circundantes de um espaço fechado. Esta visualização 4D, ajuda a estimar

a distribuição da temperatura, bem como o conforto térmico em diferentes alturas do dia. Na Figura 43, é possível observar que, das 12h00 às 14h00, o calor é mais elevado, provocando desconforto.

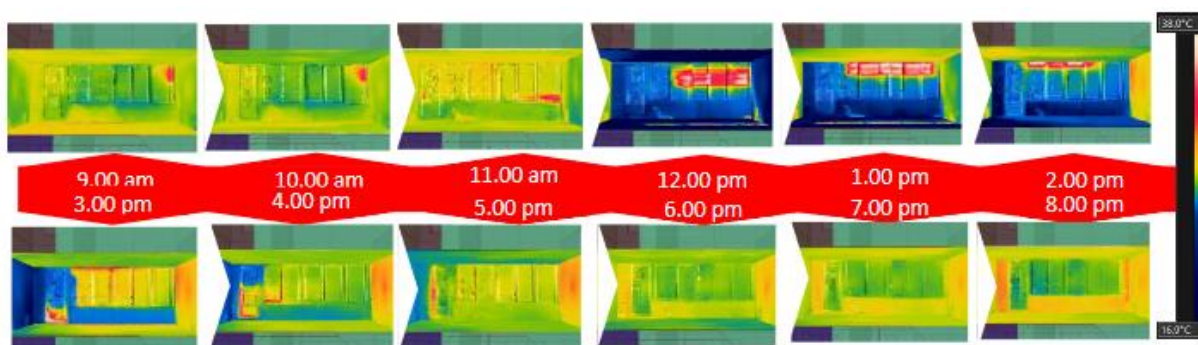


Figura 43 - Termogramas obtidos ao longo do dia de forma a criar modelo BIM 4D [33].

Tal como no BIM 3D, as imagens termográficas podem ser adicionadas como texturas nas paredes do modelo. Através de *plug-ins*, é possível associar os valores RGB (código próprio de cada cor) a valores de temperatura, como no exemplo da Figura 44. Obtém-se, assim, o valor de temperatura de cada ponto nos termogramas. Os *plug-ins* também permitem simular as mudanças de temperatura que ocorrem de um termograma para o outro. *Softwares* como o *Navisworks* podem ser utilizados para fazer a modelagem 4D temporal. O modelo 4D resultante tem potencial para ser usado como uma ferramenta de verificação das condições de construção. Um engenheiro pode observar a temperatura da superfície de diferentes áreas utilizando um mapa de cores e identificar padrões de ineficiência ou fontes de problemas. Áreas com perdas excessivas de calor ou demasiada geração de calor são exemplos de possíveis anomalias.

Escala de temperatura (°C)	Legenda de cores	R	G	B
35.5 - 38		255	255	255
33 - 35.5		255	127.5	0
30.5 - 33		255	255	0
28-30.5		127.5	255	0
25.5-28		0	255	0
23-25.5		0	255	127.5
20.5-23		0	0	255
18-20.5		0	0	127.5
16		0	0	0

Figura 44 – Exemplo de escala de cores associada a cada temperatura utilizada pelo *plug-in Grasshopper* [33].

4.4 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS UTILIZADA EM REALIDADE VIRTUAL E REALIDADE AUMENTADA

4.4.1 O QUE É A REALIDADE VIRTUAL (RV)?

A realidade virtual (RV) é uma tecnologia poderosa que permite aos humanos interagir com ambientes virtuais gerados em computador que imitam aspetos da vida real. Este mundo gerado ou construído por um especialista não é estático, é dinâmico, respondendo às ações impostas pelo utilizador. É assim definida uma particularidade importante da realidade virtual que é o facto desta interatividade ser feita

em tempo real. Isto ajuda, também, a cativar o utilizador ao ver que o mundo responde aos seus movimentos, provocando uma sensação de imersão [102].

Os primeiros usos de realidade virtual remontam ao ano 1960, sendo o principal foco o cinema e os jogos de vídeo. Em 1968 foi criado o primeiro *Head Mounted Display* (HDM) por Ivan Sutherland. No entanto, este era tão pesado que era necessário ser suspenso no teto de forma a que o utilizador o conseguisse usar. Atualmente, o seu uso é bastante acessível, quer em termos de tamanho e peso do hardware, como também em termos de custo. Existem equipamentos onde é possível inserir o telemóvel e este já é capaz de ser utilizado como visor de realidade virtual (Figura 45).



Figura 45 - Head Mounted Display que permite o uso de telemóvel para visualizar realidade virtual [103].

Atualmente, o uso principal da realidade virtual é para jogos de vídeo e cinema 3D, mas o seu uso pode ser bastante variado. Na medicina, pode ser simulada uma operação cirúrgica, permitindo assim aos estagiários, com a supervisão de especialistas, ganhar experiência sem pôr em risco a vida dos pacientes, sendo capaz de parar o processo e corrigir erros que possam surgir. Outras áreas capazes de tirar partido dos benefícios da Realidade Virtual são: militar; astronomia (treino de astronautas); design de arquitetura; treinos de condução e treinos de mecânico de carros.

Na área da engenharia civil também é possível incorporar a realidade virtual. Modelos 3D criados em *Revit* podem ser guardados e visualizados em realidade virtual. O modelo *Revit* pode ser guardado como ficheiro FBX e depois transferido para o software *Unity3D* (Figura 46). Inicialmente, é necessário definir alguns parâmetros, como pavimento e parede. Depois, o modelo é aberto dentro do programa onde é possível ser explorado como se fosse um edifício real. Isto traz grandes vantagens antes da construção do edifício ou no caso de remodelação.

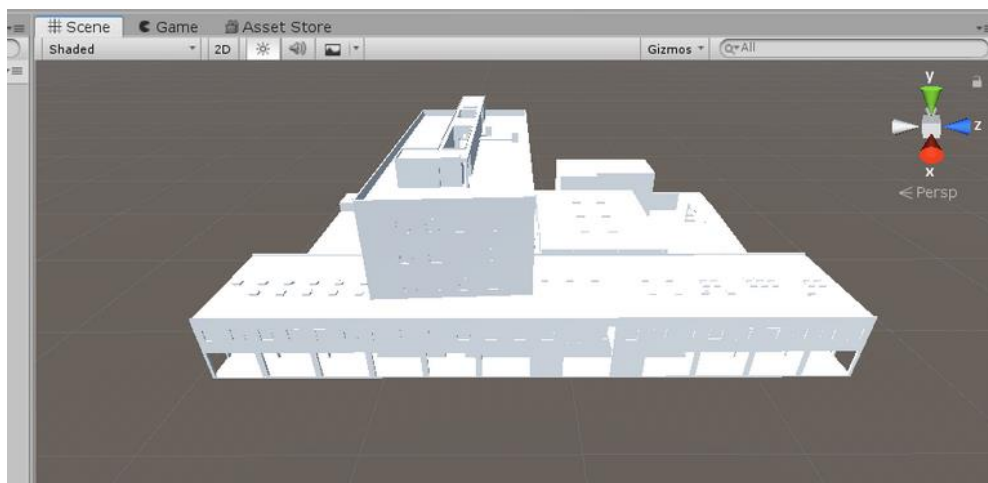


Figura 46 - Modelo do Departamento de Engenharia Civil realizado nas aulas de informática na construção

4.4.2 O QUE É A REALIDADE AUMENTADA (RA)?

A realidade aumentada (RA), tal como a realidade virtual, permite ao utilizador interagir com objetos virtuais. Contudo, enquanto que na realidade virtual a interação se realiza num ambiente virtual, no caso da RA a interação ocorre no mundo real. Desta forma, os objetos virtuais “existem” no mundo real sendo até possível coexistir no mesmo espaço que este [104]. O seu uso também foi desenvolvido por Ivan Sutherland em meados de 1960 que, utilizando um HMD com viseiras transparentes que permitiam visualizar um cubo, este se mexia em resposta do movimento do utilizador (Figura 47).

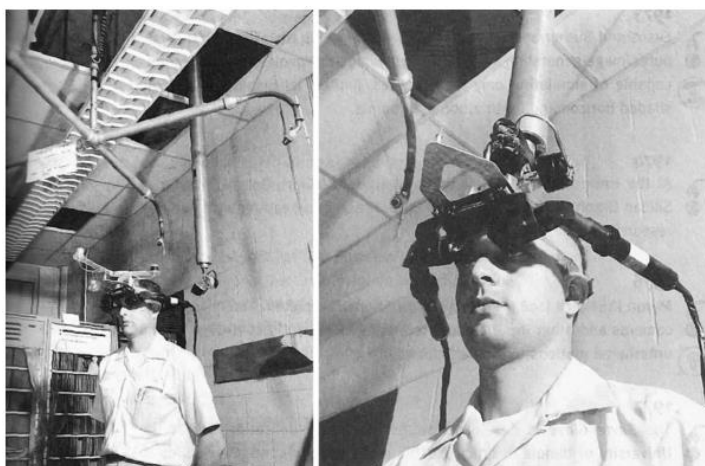


Figura 47 - Primeira utilização de realidade aumentada [105].

Normalmente, os sistemas de realidade aumentada são compostos pelas seguintes propriedades:

- Combinação de objetos reais e virtuais num ambiente real;
- É interativo e em tempo real;
- Regista os objetos reais e virtuais em simultâneo.

No caso da RA, não é obrigatório o uso de um *Head Mounted Display*. Softwares como o *Cype*, permitem visualizar detalhes inexistentes e importantes do edifício em construção através de um tablet. Em ambientes que possam ser menos interativos ou que não seja necessária tanta informação é possível utilizar um projetor. Para utilizadores em campo, torna-se bastante conveniente a sua utilização, pois permite reduzir os erros e facilita trocas de informação entre o escritório e estaleiro. É possível visualizar uma grande diversidade de componentes, como por exemplo a estrutura do edifício, a localização da canalização, sistemas de segurança contra incêndio e até mesmo aspetos importantes de segurança em obra (Figura 48). É necessário ter muito cuidado ao desenvolver um sistema de realidade aumentada pois envolve vários algoritmos como fusão de imagens, sincronização e calibração de câmaras e controlo de luminosidade. Cada um destes fatores tem diversos parâmetros que é necessário “combinar” e ajustar para que a representação visualizada esteja correta. A abundância de fatores é muitas vezes prejudicial para os programadores à medida que estes tentam as várias combinações que são mais relevantes para o seu caso [106].

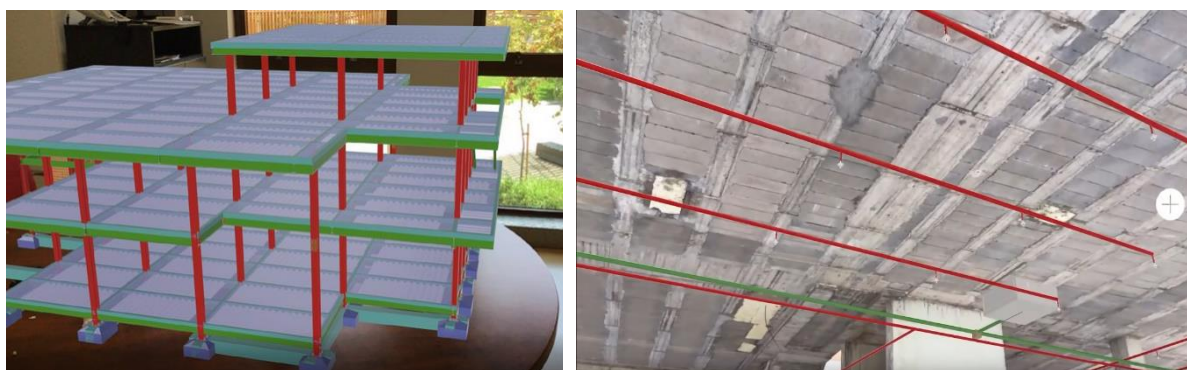


Figura 48 - a) Visualização da estrutura do edifício em realidade aumentada; b) Posicionamento de rede *Sprinklers* em realidade aumentada [107].

4.4.3 RV, RA E TERMOGRAFIA

Além dos usos mencionados anteriormente, também é possível integrar termogramas com realidade virtual e aumentada, contudo existem algumas dificuldades. Caso se utilize RV/RA e termografia, é mais prático tirar previamente os termogramas, mapeá-los e só depois visualizá-los através do equipamento. As câmaras termográficas têm um *frame rate* baixo, o que torna difícil de visualizar os termogramas em tempo real com um HMD, provocando assim inconsistências temporais e espaciais [106]. O uso de RA pode ser mais apropriado, no entanto, também apresenta certas desvantagens que devem ser tidas em conta. Normalmente para ser usado, é necessário a utilização de um tablet e, o facto de ser necessário olhar para o tablet e depois para a zona de interesse, quebra a linha de visão. O utilizador pode cometer erros de interpretação caso não haja pontos característicos suficientes que permitem caracterizar a anomalia [108, 109].

Este último ponto negativo pode ser ultrapassado utilizando um projetor que projete os termogramas captados por cima da zona de inspeção, tal como no trabalho realizado por Cifuentes et al [108], na área da medicina. O objetivo era identificar o local onde se encontravam as veias que fazem a ligação entre as veias superficiais no corpo humano e as mais profundas. Utilizando a combinação referida, foi possível detetá-las com uma precisão de 100%. De acordo com o autor, a montagem e interligação dos equipamentos foi simples e consistiu em utilizar uma câmara termográfica num smartphone ligada

diretamente ao projetor permitindo fazer a projeção em tempo real. Uma das vantagens referidas pelos autores é a portabilidade dos equipamentos.

Outra dificuldade que especialistas se deparam na construção de modelos RA é o de realizar o processo de fusão das imagens, devido aos termogramas terem resolução muito baixa. Quando se analisa um edifício, é muito mais simples a sobreposição de imagens na fachada do que no interior, pois nesta existem elementos que contêm geometrias em comum. Estas geometrias são as janelas e as varandas onde é possível observar a sua forma retangular, quer nas fotografias digitais, quer nos termogramas [76]. Através de um código desenvolvido por Liu e Seipel [76], foi possível fazer a sobreposição de imagens termográficas e digitais com um número de erros bastante aceitável. É de notar que este código não era o produto final, ou seja, não se encontrava otimizado e, se fossem definidos pontos base nas imagens, o número de erros poderia diminuir consideravelmente. Para poucas imagens, o código faz a sobreposição das imagens em cerca de 20 segundos. Este tempo pode ser considerado bastante pequeno em comparação com o tempo que se demora a percorrer o edifício para efetuar o diagnóstico das suas fachadas.

Contudo, também é possível utilizar RA no interior do edifício, apesar da sua aplicação ser mais difícil devido a não existirem elementos em comum entre as imagens ou, à repetição de padrões. Como não é possível fazer sobreposição de imagens através dos padrões analisados, é de extrema importância ter um sistema de pontos de referência eficiente de forma a que os objetos que são observados possam ser identificados no modelo sem que se perca tempo à procura deste.

No estudo realizado por El Ammari e Hammad [109], é definida a posição inicial do utilizador na entrada do edifício e depois é registado o caminho que é percorrido. Outro aspeto importante deste trabalho é o uso combinado de RA e RV com o intuito de facilitar o trabalho de campo e de escritório realizado por gestores de instalações. Na gestão de instalações complexas, normalmente é necessária uma equipa de especialistas de forma a solucionar um problema. A distância entre os intervenientes são a causa de atrasos nas decisões. Esta combinação tenta solucionar este problema e consiste em um trabalhador que se encontra no escritório e que utiliza um kit de RV, e outro trabalhador de campo com um tablet. Através do tablet é possível aceder a informação adicional da zona analisada (como, por exemplo, um corte da parede com as respetivas camadas e imagens termográficas). Assim, permite a quem vai inspecionar o edifício, não ter de memorizar vários tipos de informação e também facilitar a realização do trabalho de inspeção sem qualquer falta de informação que seja relevante ou necessária [76]. Além da informação que é possível de aceder, é também possível adicionar nova informação após as intervenções realizadas de forma a ajudar em futuras inspeções.

Apesar ser possível utilizar a Realidade Aumentada independentemente, o uso combinado de RA e RV, é 85% mais rápido e o número de erros é reduzido em 65%. É necessário ter em conta que, para utilizar este método de trabalho, é necessário um modelo BIM rico em informação detalhada do edifício e também um sistema de localização funcional.

O uso da termografia e RA/RV também pode ser utilizada de forma a detetar anomalias que comprometam a performance energética do edifício [99, 110, 111]. De forma a fazer a fazer este tipo de avaliação, é necessário criar um modelo 3D através dos termogramas e imagens digitais captadas. Este modelo é denominado de *Energy Performance Augmented Reality* (EPAR). Para a sua construção, apenas é necessário uma câmara termográfica que permita a captar os dois tipos de imagem, porém, é necessário calibrar a câmara através de um procedimento diferente do usual com o intuito de conhecer os seus parâmetros intrínsecos, que são parâmetros internos da câmara [111]. É também indispensável, fixar uma escala de cores de forma a haver coerência entre os termogramas. Após a obtenção das imagens, é criada uma nuvem de pontos a partir das imagens digitais, visto que estas têm melhor

qualidade. Através da obtenção desta nuvem, é possível utilizar uma técnica de mistura de imagens de forma a criar estruturas tridimensionais, denominada de *Structure from Motion* (SfM). A seguir, é criada outra nuvem de pontos a partir das imagens térmicas, que é ligada à nuvem de pontos das imagens digitais também através da mesma técnica de SfM. Assim, é criado um modelo térmico com uma nuvem de pontos densa, em que é possível o cálculo do valor de U dos elementos. A seguir, é realizada uma simulação de *Computer Fluid Dynamics* (CFD), com o mesmo sistema de coordenadas que o modelo obtido previamente, para que estes se sobreponham. Esta simulação permite prever quais as variações de temperatura expectáveis e compará-las com os termogramas obtidos originalmente. Para um diferencial de valores superiores aos definidos pelo utilizador, o programa marca essas as zonas consideradas anómalas para que se possa realizar um diagnóstico mais aprofundado. Também é possível prever o custo associado às perdas de energia nas anomalias [112]. O modelo EPAR pode ser visto a partir de RV, sendo possível visualizar as imagens termográficas ou digitais. Na Figura 49 podem ser visualizadas todas as fases do modelo gerado a partir da nuvem de pontos das imagens térmicas e digitais, o modelo de simulação CFD e a vista de dentro do modelo das imagens captadas.

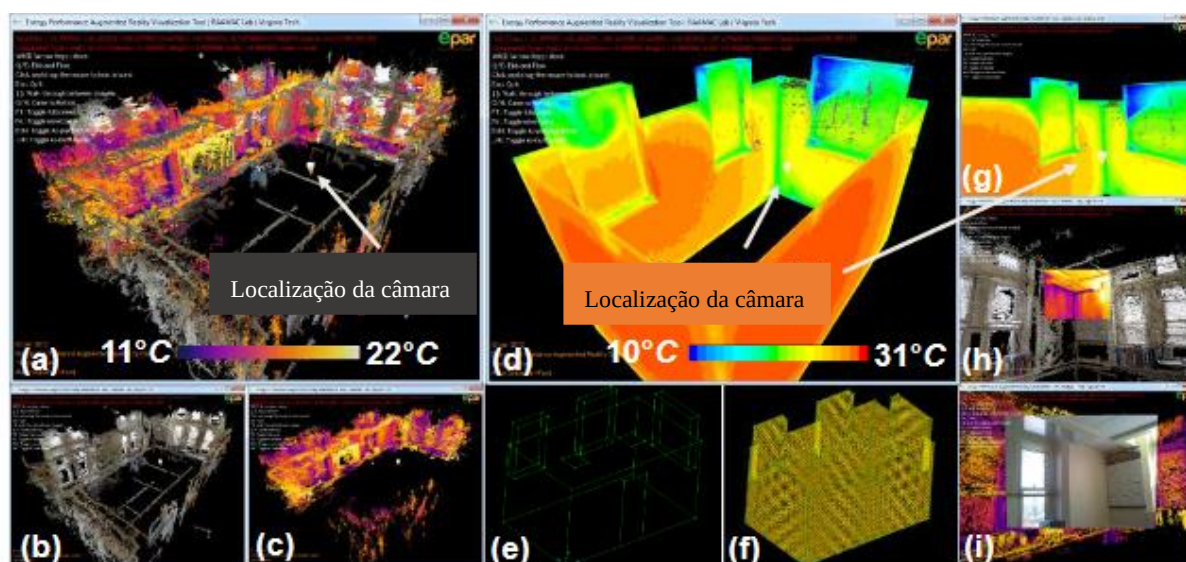


Figura 49 – a) Modelo gerado com a nuvem de pontos da imagem térmica e digital; b) nuvem de pontos digital; c) nuvem de pontos térmica; d) Modelo CFD; e) Fronteiras do modelo; f) Malha do modelo; g) Simulação do comportamento térmico; h) Vista de imagem térmica no interior do modelo; i) Vista de imagem digital no interior do modelo [111].

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A junção da termografia com drones tem vinda a ser testada ao longo dos últimos anos. Os resultados dos ensaios realizados têm sido positivos e possibilitam abordar o estudo de elementos construtivos de uma maneira diferente. Com os futuros avanços tecnológicos, é expectável que ocorra uma diminuição do peso, quer dos componentes dos drones quer dos equipamentos que possam ser acoplados e que, à medida que as baterias se tornem mais eficientes, o período de voo se prolongue. O tempo de voo é um dos maiores impedimentos para inspeções realizadas em grandes áreas que, caso seja resolvido, facilitará futuros trabalhos.

O uso de modelos BIM permite armazenar informação relevante da edificação que pode ser utilizada ao longo da vida útil do mesmo. Tal como os drones, já vários trabalhos abordam a junção entre a termografia e modelos BIM. A sobreposição de termogramas no modelo permite perceber, de uma forma tridimensional, o comportamento térmico do mesmo. Simulações realizadas em BIM 4D permitem uma análise energética realista do edifício. Contudo, o grau de complexidade e trabalho envolvidos na criação de um modelo BIM de um edifício faz com que o seu uso não seja tão regular como o desejado. Pequenos pormenores, como evitar a sobreposição de elementos construtivos, são necessários de forma a limitar os termogramas, e as simulações terem um desempenho igual à realidade. O custo da criação de um modelo BIM é superior comparado aos tradicionais projetos CAD, o que pode influenciar a escolha do cliente.

A realidade virtual e a realidade aumentada, apesar de não serem tecnologias recentes, apenas atualmente se começa a dar os primeiros passos na sua plena utilização, que permita explorar a totalidade do seu potencial. Apesar de muitas questões que impediam a sua implementação no dia a dia terem sido resolvidas, ainda existem fatores que devem ser melhorados, como por exemplo, a portabilidade. A junção da termografia com estas duas tecnologias, é predominante na área da medicina onde é mais fácil a sua aplicação. No setor construtivo, a sua aplicação é mais difícil. O *frame rate* das câmaras termográficas é muito baixo o que torna incompatível a termografia e a RV em tempo real. Inicialmente, é necessário captar os termogramas, sobrepor as imagens no respetivo modelo e só depois é possível visualizá-los dentro deste. A sobreposição dos termogramas também é um processo que pode ser difícil pois depende da área analisada. Se um edifício tiver a mesma disposição ao longo dos vários pisos, é difícil de distinguir, por exemplo, um termograma do corredor do segundo piso e um termograma do corredor do terceiro piso. A RA é atualmente mais compatível com a termografia, porém, o equipamento usado pode condicionar a sua utilização. Tendo em conta as desvantagens referidas, com os futuros avanços tecnológicos, é expectável que existam equipamentos mais práticos de transportar e tornem o seu uso mais frequente. Além disto, melhorias nas câmaras termográficas, como a qualidade de imagem e o *frame rate*, poderão tornar mais prática sua a combinação.

5

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA UMA CONSTRUÇÃO NOVA

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo deste capítulo é expor uma metodologia proposta pelo autor. Parte-se do princípio de que esta metodologia será aplicada a novas edificações que possuam um modelo BIM desde a fase do projeto. A metodologia foi desenvolvida a partir do conhecimento adquirido nos artigos consultados e referidos nesta dissertação. Pretende-se que seja coerente com os procedimentos realizados nos outros artigos de forma a criar uma base para novos trabalhos práticos que venham a ser realizados. Contudo, deve ter-se em consideração que a metodologia proposta é puramente teórica, não tendo sido testada a sua eficácia em casos reais. Por este motivo, e devido aos inúmeros cenários que podem ocorrer durante a fase de execução ou a fase de utilização da edificação, os passos sugeridos não são definitivos e podem ser sujeitos a mudanças, de forma a serem adaptados às situações e/ou dificuldades que possam surgir durante os procedimentos. Na Figura 50, é possível analisar se a metodologia proposta, de uma forma geral, sendo apresentado os passos de forma mais detalhada ao longos dos próximos subcapítulos.

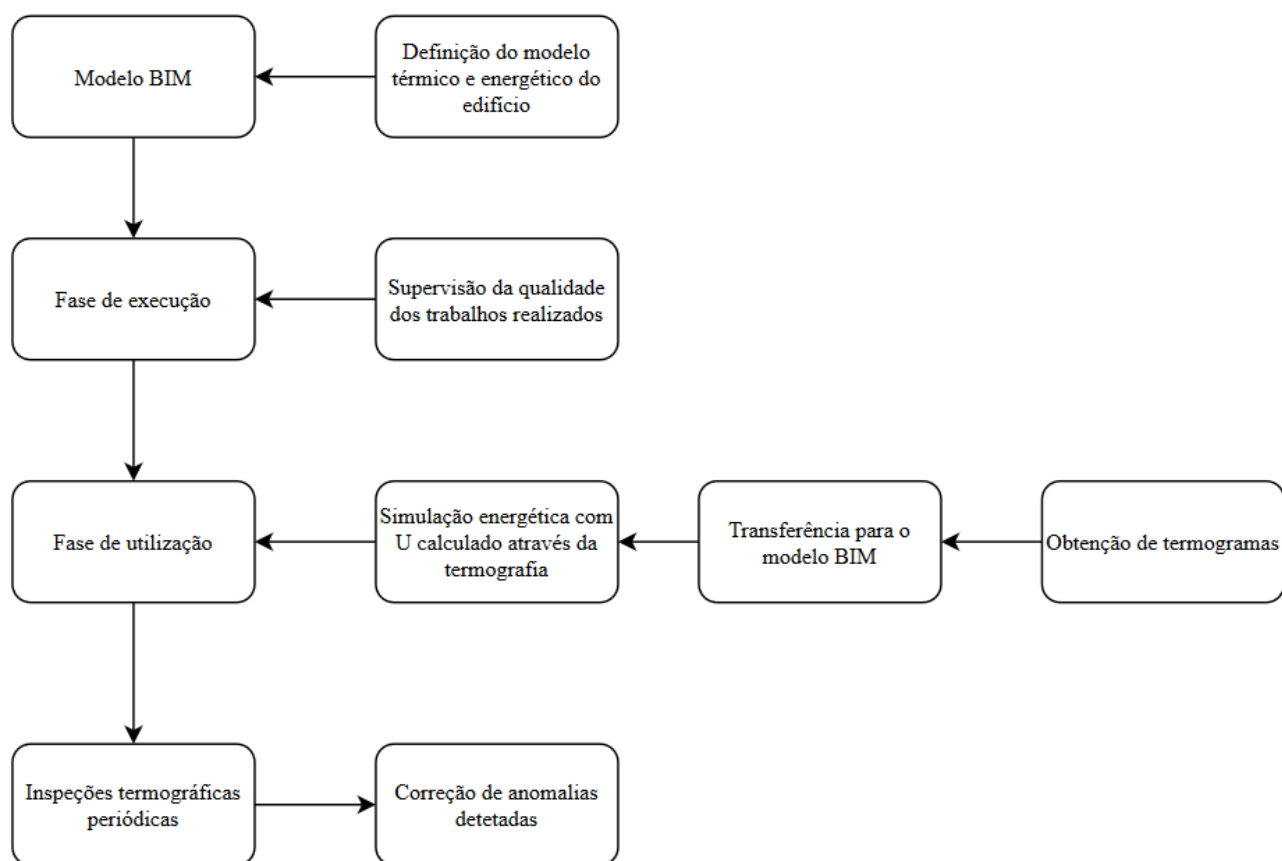


Figura 50 – Visão geral da metodologia proposta.

5.2 METODOLOGIA

5.2.1 CRIAÇÃO DO MODELO BIM DO EDIFÍCIO

De forma a construir uma edificação, é necessário realizar um projeto de arquitetura do mesmo, com o intuito de representar a edificação a executar. Um dos objetivos deste trabalho é a implementação das novas tecnologias com a termografia. Por este motivo, apesar do projeto de arquitetura ser normalmente representado em papel ou realizado em CAD e depois impresso, nesta metodologia, considerou-se a utilização de um modelo BIM. A aplicação de um modelo BIM vai permitir ter muita mais informação relevante sobre o edifício, quer durante a fase de execução, quer durante a fase de utilização.

5.2.2 DEFINIÇÃO DO MODELO TÉRMICO E ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO

Após criar o modelo BIM, é possível realizar uma simulação do comportamento térmico e energético da edificação. Para isto, é necessário: definir os materiais utilizados juntamente com as respetivas propriedades térmicas e realizar a sua correspondência no modelo; definir a localização da edificação; e definir o tipo de construção/ocupação (ventilação e ganhos internos) (Figura 51) [113]. Em termos das propriedades dos materiais utilizados na construção, os que são necessários para realizar a simulação térmica são a espessura, a condutividade térmica, o calor específico e a densidade. De todos os mencionados anteriormente, apenas os dois primeiros parâmetros são utilizados para calcular a

resistência térmica do elemento, que por sua vez permite saber o valor do coeficiente de transmissão térmica. A localização do edifício tem de ser inserida de forma a que o software possa descarregar das bases de dados os respetivos dados climáticos. O tipo de construção também tem influência nos ganhos e perdas de calor internos devido ao número de ocupantes e os padrões de uso da mesma, nomeadamente em termos de ventilação. Além dos parâmetros definidos anteriormente, existem outros parâmetros adicionais que melhoram a precisão da simulação, no entanto, condiciona o tempo de processamento. O software BIM pode, assim, fornecer informação que caracteriza o comportamento do edifício, o local onde está inserido, informações de projeto e das condições meteorológicas locais (vento, temperatura e humidade), os padrões de uso e custos do consumo de energia, emissões de CO₂, ganhos e perdas de calor, entre outros [113].

Esta primeira simulação térmica e energética é feita a partir dos valores teóricos das propriedades dos materiais. Esta simulação inicial pode ser comparada com uma simulação que será realizada utilizando os dados obtidos a partir dos termogramas captados no final da construção do edifício. Assim, é possível comparar resultados entre ambas e analisar se o edifício tem o comportamento expectável. Aconselha-se também estudar as correlações entre ambos nos modelos, para que seja possível, a partir da validação do modelo, prever futuros comportamentos de edificações.

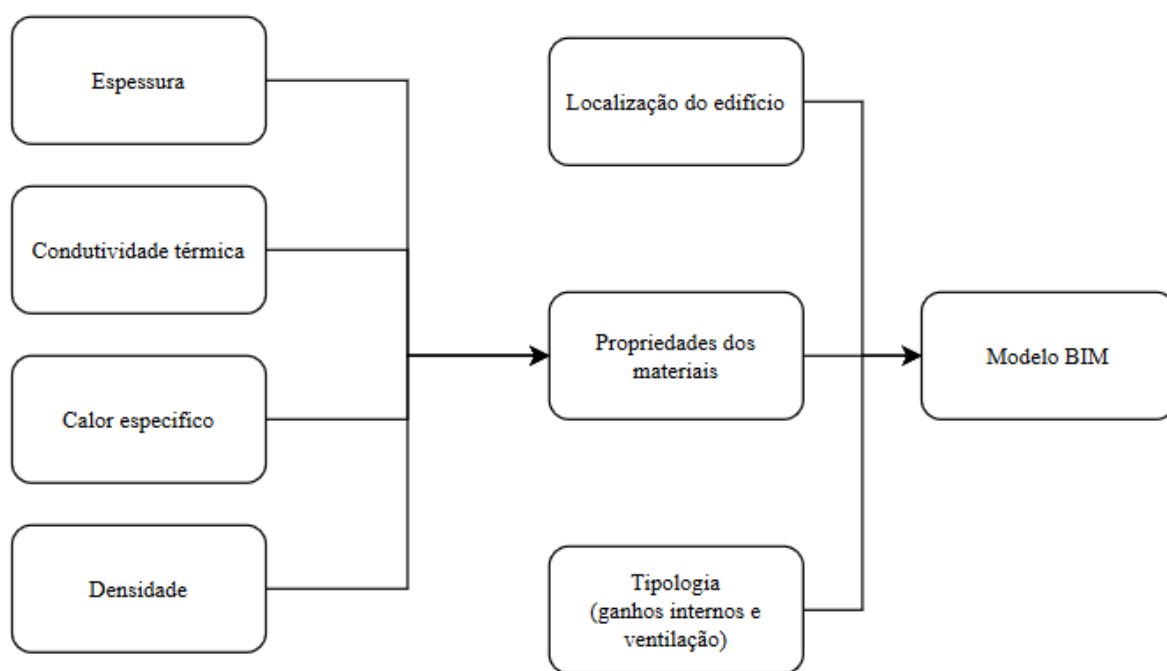


Figura 51 – Parâmetros e propriedades necessárias para caracterizar o modelo BIM e realizar a simulação do modelo térmico e energético.

5.2.3 FASE DE EXECUÇÃO

Após finalizados os processos de início de obra e planeamento dos trabalhos a serem realizados, é iniciada a fase de execução. Nesta fase é realizada a construção de todo o edifício em concordância com o modelo BIM definido previamente.

Tal como referido no capítulo 3, a utilização da termografia de infravermelhos é um método viável para detetar e determinar a severidade de defeitos. Porém, a maior parte dos estudos que foram analisados neste trabalho focavam-se nos defeitos pós-construção. A reparação de anomalias após finalizada a fase de execução pode provocar atrasos no início da ocupação e despesas inesperadas que podiam facilmente ser reparadas a custo muito inferior se detetadas durante a construção. Apesar de ainda existir pouca literatura sobre este assunto, a termografia pode contribuir para avaliar a qualidade dos trabalhos realizados durante o decorrer da obra [35].

De forma a serem realizadas inspeções termográficas durante a construção do edifício, existem alguns cuidados que devem ser tidos em conta [35], entre eles: estabelecer um fluxo de temperatura contínuo entre o interior e o exterior, se possível de pelo menos 10°C; não tenha ocorrido precipitação ou incidido luz solar diretamente nas superfícies analisadas antes da realização dos ensaios; e identificar materiais que possam causar reflexões e possuam valores de emissividade muito baixos. A implementação destas condições, apesar de parecer ter um carácter simples, durante a fase de execução, pode representar um desafio. Em algumas situações, é possível, apenas através dos ganhos solares, manter um fluxo constante. No entanto, o fluxo de temperatura contínuo pode ser difícil de controlar pois depende do estado em que se encontra a envolvente (isolamento e entradas de ar). Ademais, caso o sistema de aquecimento ainda não tenha sido executado, não é possível utilizá-lo para garantir uma temperatura estável. As infiltrações de água e a radiação solar podem também influenciar os termogramas captados e levar a conclusões erradas. Por último, a existência de equipamentos em obra ou outros materiais expostos podem provocar reflexões nos termogramas e, por isso, deve ter-se sempre especial atenção relativamente à área envolvente da região que vai ser analisada. Tendo estes fatores em conta e devidamente controlados, pode iniciar-se a inspeção termográfica do edifício. Na Figura 52, é apresentado uma seleção de passos a serem realizados durante a inspeção na fase de execução.

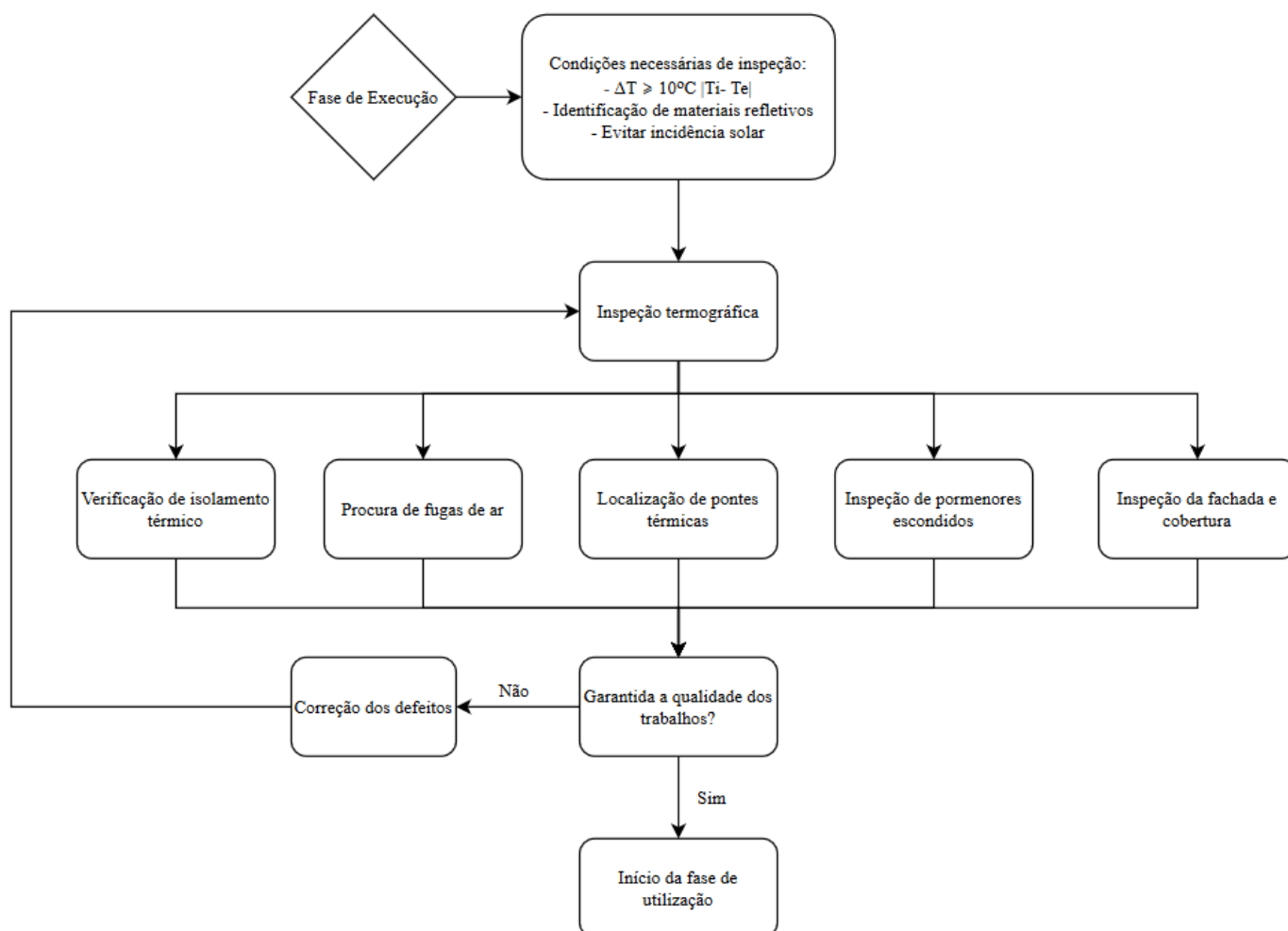


Figura 52 – Condições e passos a serem realizados nas inspeções durante a Fase de Execução.

Isolamento térmico e Localização de pontes térmicas

A má aplicação ou falhas do isolamento térmico causam pontes térmicas e provocam desconforto aos utilizadores. As pontes térmicas são lugares onde ocorre uma falha do isolamento térmico devido a interrupções no pano de alvenaria. Zonas mais comum de ocorrerem pontes térmicas devem ser inspecionadas com detalhe. Entre estas, os locais mais usuais são: zonas de pilares, lintéis e lajes. É também possível medir a sua severidade, como referido por Pearson [17]. Sendo assim, de forma a verificar se a sua aplicação foi bem-sucedida, deve inspecionar-se os elementos construtivos após a sua construção de forma a corrigir as anomalias o mais depressa possível. Para que isto seja possível durante a fase de execução, é aconselhável a utilização do método ativo, uma vez que permite realçar o contraste entre as zonas com e sem isolamento. Uma das dificuldades que se pode apresentar durante a realização dos ensaios é a zona que é possível cobrir com as fontes de aquecimento que, em grandes áreas, pode tornar-se um processo demoroso. Caso a inspeção esteja a ser realizada numa divisão, é aconselhável que não circulem trabalhadores nas proximidades, de forma a não influenciar os termogramas.

Identificação de fugas/infiltrações de ar

As fugas de ar apenas podem ser verificadas através da termografia após a aplicação das serralharias (janelas) e carpintarias (portas). É também necessário estabelecer um diferencial de pressão e temperatura entre o interior e o exterior. Como já mencionado anteriormente, a termografia não permite medir o fluxo de ventilação, apenas permite visualizar o local onde se encontram as infiltrações. Após localizados os locais de infiltrações de ar, pode então proceder-se à sua reparação.

Inspeção de pormenores escondidos

Os pormenores escondidos são elementos fundamentais para o correto funcionamento de vários equipamentos do edifício. Através de inspeções termográficas é possível visualizar se estes apresentam anomalias que comprometam o seu desempenho. Tal como mencionado no capítulo 3.7, os pormenores escondidos podem ser desde tubos de abastecimento e drenagem de águas até tubos de sistema de aquecimento e ventilação que se encontram embutidos nos elementos construtivos. É necessário aplicar um diferencial de temperatura para que estes sejam visíveis, visto que, em condições normais, se encontram em equilíbrio térmico com o elemento construtivo.

Inspeção da fachada do edifício

Após a aplicação do revestimento, é necessário verificar se não existem descontinuidades ao longo do seu desenvolvimento. A forma mais adequada de realizar a inspeção à fachada do edifício depende da sua altura. No caso de um edifício de pequenas dimensões, apenas é necessária uma inspeção termográfica de forma manual. A dificuldade deste tipo de inspeção apresenta-se em edifícios de vários pisos em que não é possível utilizar a câmara termográfica ou a área que é necessário inspecionar é demasiado elevada. Assim, nestes casos, é possível recorrer à utilização de UAV's. Com esta combinação, é possível realizar a inspeção de grandes áreas e a diferentes alturas sem colocar em risco a integridade dos operadores. O objetivo desta inspeção à fachada é verificar a continuidade de todo o revestimento e possíveis anomalias no comportamento térmico da envolvente. O uso de drones possibilita, também, a inspeção da cobertura e dos componentes dos sistemas de AQS que lá se localizam. Como é expectável, é necessário um utilizador experiente no manuseamento do equipamento de forma a evitar acidentes ou que este se danifique. O plano de voo deve ser planeado previamente para que seja o mais eficiente possível e evite colisões com elementos na envolvente (cabos de alta tensão ou árvores). É possível realizar o planeamento através do modelo BIM do edifício, assumindo que não existem diferenças entre o modelo e a realidade.

5.2.4 INÍCIO DA FASE DE UTILIZAÇÃO

Tendo sido garantida a qualidade dos trabalhos e finalizado o processo construtivo, inicia-se a fase de utilização do edifício. No início desta fase, existem vários procedimentos que devem ser realizados. Primeiramente, é necessário analisar se o produto final da obra corresponde exatamente ao modelo BIM inicial. É frequente existirem erros, quer no decorrer do processo construtivo (em que os trabalhadores não cumpriram o design planeado), quer no modelo BIM (uma correção que foi necessário realizar em obra e não foi atualizada no modelo). Este tipo de erros alteram a geometria final do edifício em relação ao esperado e, por este motivo, é necessário realizar uma atualização do modelo BIM para que este represente com exatidão a realidade. Raimbaud et al [114], propõem um método de atualização do modelo através do uso de *Mixed Reality* (MR). Neste método proposto pelos autores é utilizado um

drone com uma câmara de vídeo que grava um percurso predefinido, inicialmente planeado no modelo e depois replicado na realidade. De seguida, é feita uma sobreposição de imagem entre o modelo e o vídeo. Ao detetar elementos que não se encontrem em concordância com o modelo inicial, são feitas anotações que depois são importadas para o modelo BIM, onde se podem realizar as correções. Contudo, o método ainda tem algumas desvantagens, tal como referido pelos autores. Primeiramente, dá uma sensação de duplo trabalho, pois é necessário ir ao local, capturar o vídeo, fazer a sobreposição com o modelo, analisá-lo e só depois fazer as correções. Segundo, este método é difícil de ser aplicado em edifícios com uma altura elevada.

Corrigidas as diferenças entre o modelo e a realidade, resultando assim num modelo BIM 3D correspondente à realidade, pode ser iniciado o segundo momento da fase de utilização. Nesta segunda parte da fase, começa por captar-se termogramas quer do interior quer do exterior do edifício. É aconselhável fixar uma escala de temperatura nos termogramas para que exista coerência entre estes. Os termogramas do exterior podem ser realizados com o auxílio de drones para não pôr em risco a segurança dos inspetores. É importante salientar que os termogramas devem sobrepor-se entre 70% a 80% quer na vertical, quer na horizontal, para que seja mais simples através de softwares sobrepor as imagens no modelo. Podem ser realizadas simulações EPAR do interior do edifício, de forma a ver se as divisões dos edifícios apresentam anomalias não detetadas durante o decorrer da obra pelo inspetor termográfico. Presumindo que não existem anomalias no comportamento dos elementos construtivos, pois foi verificada a sua qualidade ao longo do processo construtivo, é realizado o cálculo do valor de U real através da termografia. É preciso ter em conta as precauções necessárias como – determinação da temperatura refletida e da emissividade, não ocorrer incidência solar diretamente sobre o elemento em estudo e um diferencial de temperatura de 10°C a 15°C entre o interior e o exterior. Os valores de U são adicionados aos elementos construtivos correspondentes no modelo BIM. Os termogramas captados durante esta fase são adicionados como texturas ao modelo BIM de forma a torná-lo mais rico em informação. Caso a câmara termográfica também capte fotografias digitais, estas também podem ser adicionadas ao modelo para dar uma visualização realista do mesmo. O facto do valor de U ser adicionado aos elementos correspondentes, permite, através do modelo, realizar uma simulação térmica e energética com recurso a softwares próprios de avaliação energética e a sua respetiva avaliação.

É também possível, através do modelo BIM, estimar o conforto térmico. Para isto, é necessário captar termogramas de cada divisão, várias vezes ao longo do dia. O intervalo de tempo entre os termogramas deve ser definido previamente. Os vários termogramas também podem ser adicionados como textura ao modelo BIM (BIM 4D). Além de ser possível medir o conforto térmico, esta visualização 4D também permite estimar a distribuição da temperatura. Durante a captação dos termogramas, é aconselhável fixar uma escala de temperaturas.

Na Figura 53, é possível observar os passos a serem realizados no início a fase de utilização.

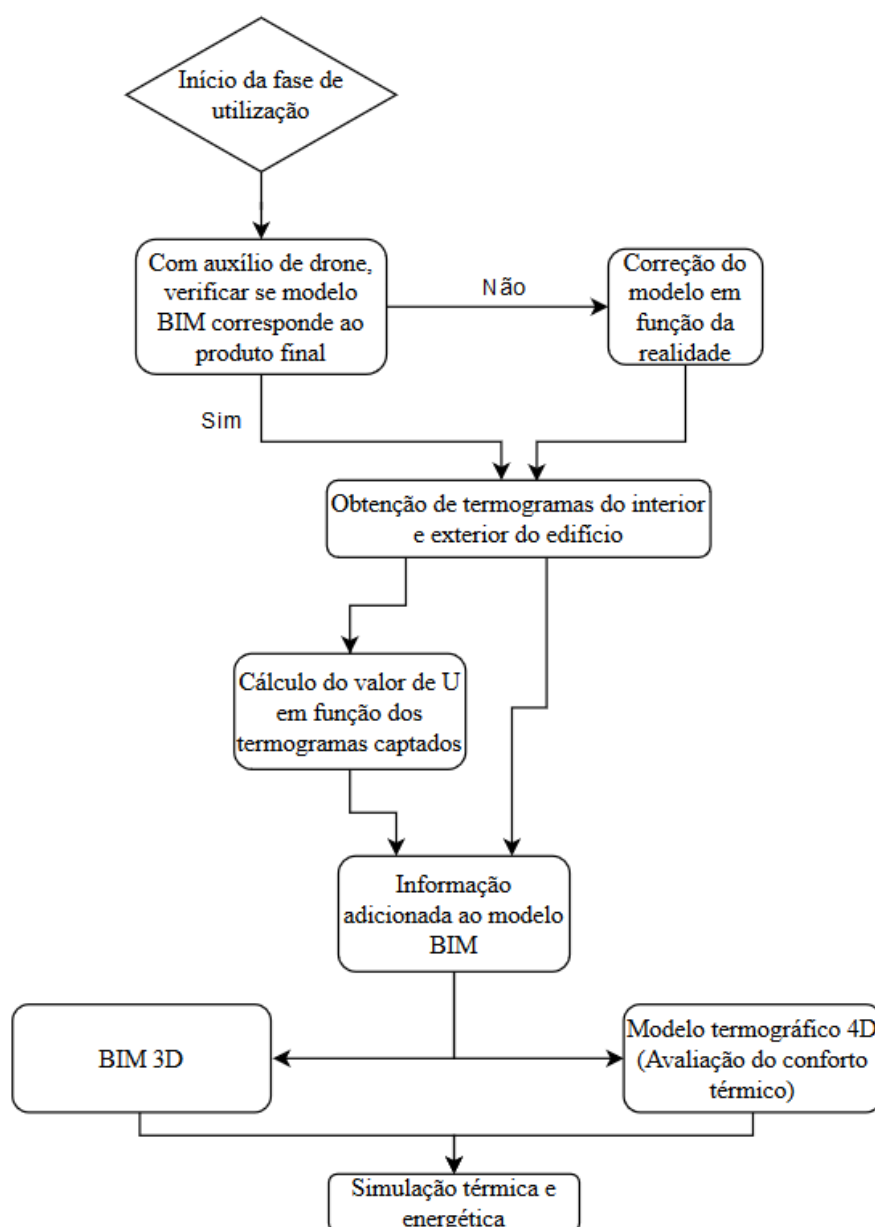


Figura 53 – Procedimentos a serem realizados de forma a fazer uma simulação térmica e energética realista do edifício.

5.2.5 INSPEÇÃO DO EDIFÍCIO NO DECORRER DA FASE DE UTILIZAÇÃO

De forma a evitar a degradação dos materiais, é aconselhável a realização de inspeções periódicas quer do interior, quer do exterior da edificação.

A inspeção exterior pode ser realizada com o auxílio de um drone e o plano de voo deve ser definido previamente. Em princípio, pode ser utilizado o mesmo percurso que o utilizado para inspecionar as diferenças entre o modelo BIM e o produto final *as-built*. Caso não se utilize o mesmo plano de voo, pode sempre planear-se um novo com o auxílio do modelo BIM atualizado. Esta inspeção tem como objetivo encontrar anomalias no revestimento, tais como, descolamento ou fissuração. Ainda com o

auxílio do drone, deve ser realizada uma inspeção na cobertura e ainda, caso existam, a detecção de falhas de funcionamento de painéis solares. Caso seja necessário realizar uma inspeção mais detalhada de alguma anomalia, pode diminuir-se a distância do drone em relação ao elemento em estudo para que seja possível realizar uma análise quantitativa.

Finalizada a inspeção ao exterior, é iniciada a inspeção ao interior. Nesta inspeção são captados termogramas que depois devem ser adicionados ao modelo BIM. A grande dificuldade que se apresenta neste procedimento é o facto de existirem poucos pontos de referência que permitam ao software realizar a sobreposição de imagens termográficas no modelo. No caso de pequenos edifícios, o processo pode ser feito de forma manual, contudo, para edifícios de elevadas dimensões torna-se irrealista. De forma a facilitar o procedimento, pode ser utilizado um robô móvel, semelhante a um carro telecomandado, que possui uma câmara termográfica [115]. Este robô, capta os termogramas e cria uma nuvem de pontos e o respetivo modelo termográfico. Este modelo termográfico é depois sobreposto com o modelo BIM. A desvantagem do método anterior é que a nuvem de pontos criada pode ser pouco densa. Com os futuros avanços tecnológicos, é expectável que este processo crie nuvens de pontos mais densas, criando uma representação mais aproximada da realidade. Após detetada uma anomalia no edifício, esta é anotada no modelo BIM juntamente com o termograma e a respetiva imagem digital. Assim, permite ao responsável da manutenção analisar o modelo e as respetivas imagens e definir o plano de intervenção a ser realizado.

De seguida, na Figura 54, pode observar-se o processo de inspeção, quer do interior quer do exterior, a ser realizado na fase de utilização.

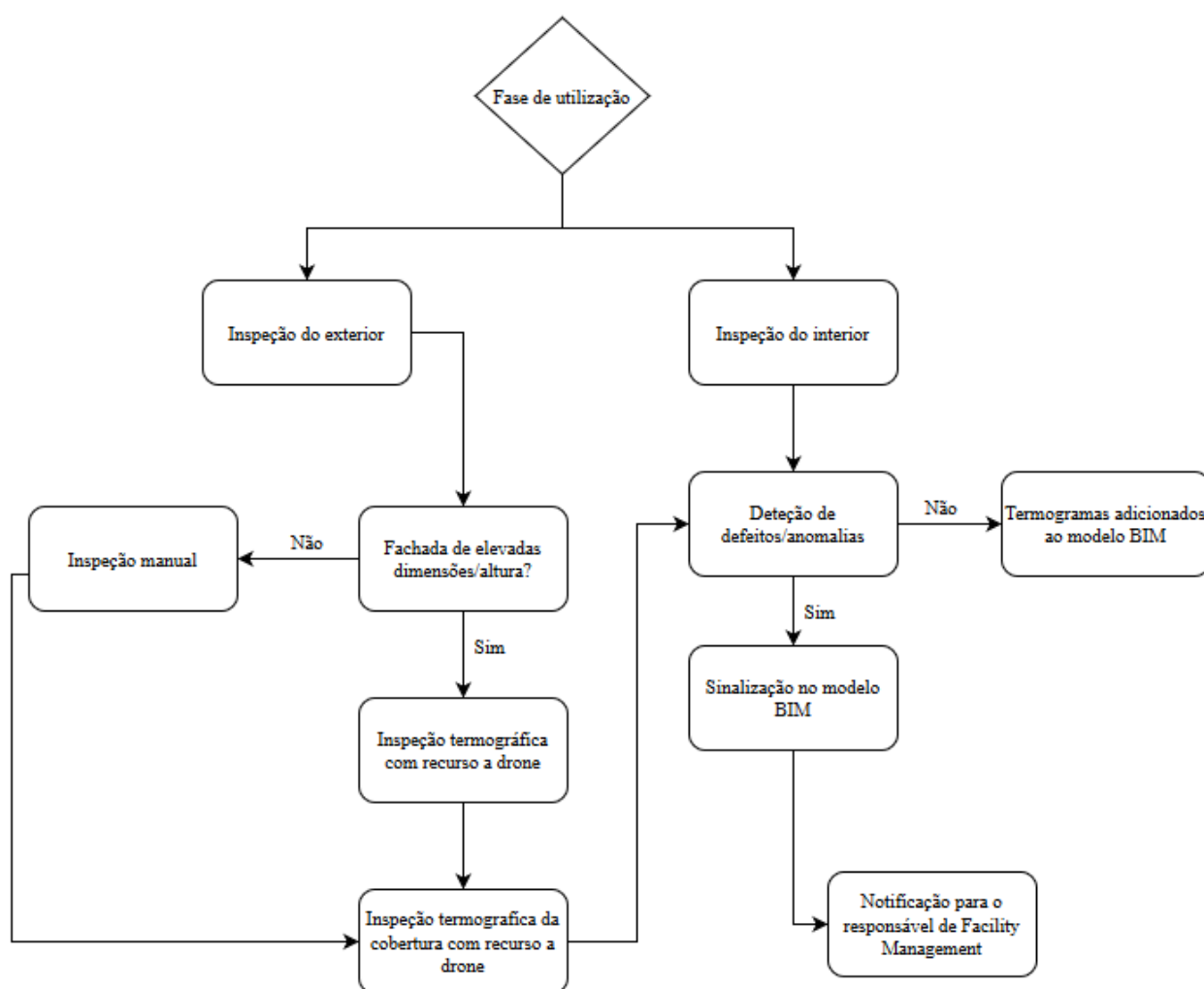


Figura 54 – Processo de inspeção durante a fase de utilização.

5.2.6 PROCEDIMENTO DE CORREÇÃO DE ANOMALIAS

De forma a realizar a correção da anomalia é enviado um técnico ao local. Este, encontra-se munido de um equipamento de RA que permite ter acesso a informações relevantes que foram incorporadas no modelo BIM (camadas constituintes e respetivas espessuras, imagens térmicas, localização de tubagens, entre outras). Caso seja necessário, o técnico pode contactar uma equipa de especialistas que remotamente, através de equipamento de RV consegue visualizar o mesmo que o técnico. Assim, é possível definir uma estratégia eficaz e instruções adicionais que permitam a correção da anomalia. A dificuldade apresentada neste passo é o facto de ser necessário um sistema de localização eficiente, uma vez que é ineficaz utilizar um sistema de GPS, pois o sinal dentro de edifícios é habitualmente fraco.

Corrigida a anomalia, são realizados novos termogramas do local intervencionado que devem ser adicionados ao modelo BIM. Além destes, podem também ser adicionados comentários que sejam relevantes para futuras inspeções ou intervenções. Através do modelo, é possível realizar-se uma comparação entre os termogramas pré e pós correção, o que permite determinar se a correção foi bem-sucedida. O facto de serem adicionados os termogramas das várias inspeções termográficas permite ter a perceção da evolução do comportamento térmico dos elementos e quais se encontram a um ritmo de degradação mais acelerado, ou então, não estão a ter um comportamento igual ao expectável. Na Figura 55, encontra-se organizado num fluxograma, os procedimentos descritos anteriormente.

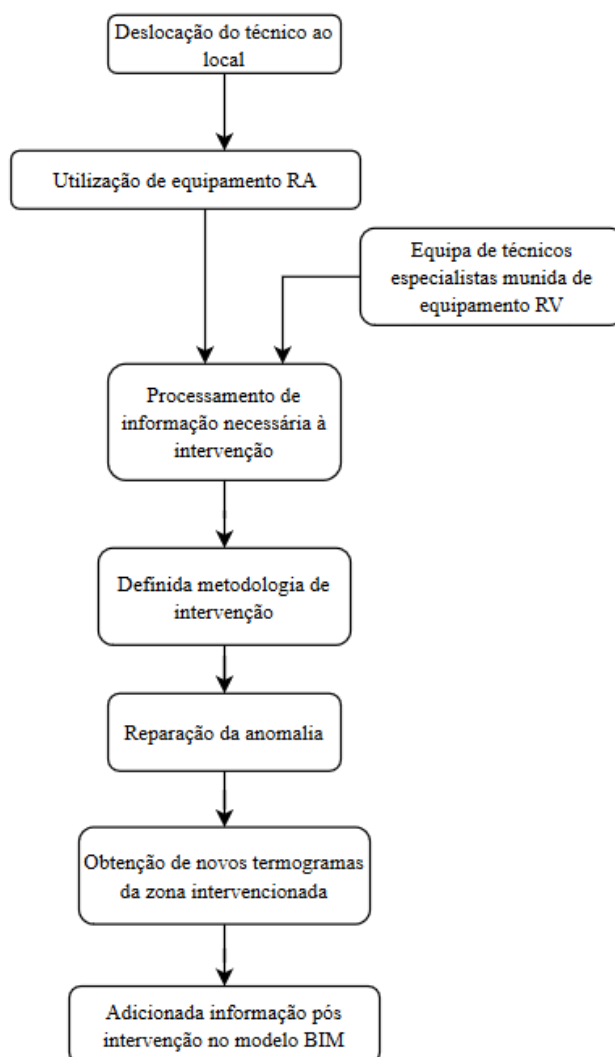


Figura 55 – Procedimentos a serem realizados após a deteção de uma anomalia.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

A presente dissertação apresenta uma grande quantidade de informação reunida através da consulta de artigos e outros trabalhos científicos já realizados em relação à termografia, e a junção desta com novas tecnologias como UAV's, modelagem BIM, realidade virtual e realidade aumentada. Com base na análise crítica da literatura existente sobre estes tópicos, foi desenvolvida uma metodologia para novas edificações com o intuito de melhorar a qualidade da obra e ajudar à manutenção de um desempenho adequado do edifício ao longo da sua vida útil. Assim, foi possível concluir que:

- Existem numerosos e variados trabalhos publicados sobre a aplicação manual da termografia para a deteção de defeitos quer do interior, quer do exterior das edificações. Assim, já se pode prever qual o comportamento de determinados defeitos e tirar conclusões assertivas e fiáveis da análise dos termogramas. Os termogramas obtidos podem ser analisados de forma qualitativa e/ou quantitativa, sendo possível realizar estudos estatísticos sobre a severidade das anomalias;
- A utilização de drones para a realização de inspeções termográficas já foi testada e existem várias vantagens na sua utilização, tais como, a preservação da segurança de quem realiza a inspeção, a possibilidade de observar grandes áreas, a possibilidade de georreferenciar os termogramas e reduzir custo das inspeções. Contudo, também existem desvantagens que devem ser tidas em conta, entre estas, o tempo reduzido de voo dos drones atuais, a necessidade de realizar vários voos para áreas de elevadas dimensões, o que dificulta a junção dos termogramas, e, por último, a termografia ser altamente dependente de parâmetros climáticos que variam ao longo dos ensaios. Apesar das desvantagens referidas, a junção das duas tecnologias beneficia as inspeções realizadas a edifícios;
- A modelagem BIM, apesar de trazer bastantes vantagens para o setor construtivo, ainda não é amplamente utilizada sobretudo devido à falta de informação generalizada sobre as suas vantagens. Um projeto BIM permite adicionar informação referente à obra, desde o tipo de materiais a utilizar, organização de trabalhos em estaleiros, entre outros. A sobreposição de termogramas no modelo BIM permite adicionar uma camada de informação relevante, não só em termos de simulações energéticas, mas também para facilitar o processo de decisão de áreas a intervir. Caso os termogramas sejam adicionados ao longo da fase de utilização, é possível perceber quais as áreas sofreram uma degradação mais acelerada;
- Em termos de realidade virtual e aumentada, a sua fusão com a termografia no setor construtivo ainda se encontra numa fase muito inicial. Problemas como o *frame rate* das câmaras termográficas ser muito baixo, torna incompatível a visualização dos elementos em tempo real. Outra questão que

tem que ser resolvida é a portabilidade dos equipamentos. Ao usar um tablet em RA, é necessário quebrar a linha de visão entre o termograma e o elemento construtivo. Pode ser adicionado um projetor, mas é necessário ter em conta a complexidade de transportar ferramentas para realizar intervenções, levando a que não seja prático o transporte de equipamento adicional. Além disto, é necessário localizar com precisão o local onde se encontra o equipamento de RA pois, em edifícios de vários pisos, não é prático localizar com exatidão dentro do modelo os termogramas correspondentes. Sistemas como *GPS*, perdem a conexão no interior dos edifícios e, por este motivo, é necessária uma alternativa. Neste momento, existem alternativas como, por exemplo, o *Ultra Wide Band* (UWB), no entanto, os custos relativos à infraestrutura são demasiado elevados.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apontam-se como trabalhos futuros:

- Realização de ensaios utilizando a metodologia proposta e verificação da sua eficácia. É de notar que poderão existir pontos que possam vir a ter que ser retificados de forma a adaptar-se à obra em causa;
- É necessário melhorar a combinação entre realidade virtual e a realidade aumentada com a termografia para tornar mais práticas as intervenções realizadas durante a fase de utilização;
- Testar o tempo de voo de novos drones que surjam no mercado, assim como a portabilidade de novos equipamentos de RA, facilitando alguns passos da metodologia.

Referências Bibliográficas

1. Minkina, W. and S. Dudzik, *Infrared thermography: errors and uncertainties*. 2009: John Wiley & Sons.
2. Leite, D.d.O. and R.J. Prado, *Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio*. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2012. **34**(2): p. 1-9.
3. Hart, J., *BR 176 A practical guide to infra-red thermography for building surveys*. BRE, Watford, 1991.
4. Barreira, E., et al., *Infrared Thermography Application in Buildings Diagnosis: A Proposal for Test Procedures*, in *Industrial and Technological Applications of Transport in Porous Materials*. 2013. p. 91-117.
5. Bernard, V., et al., *Infrared camera assessment of skin surface temperature—effect of emissivity*. Physica Medica, 2013. **29**(6): p. 583-591.
6. Barreira, E., *Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios*. Dissertação de Mestrado.
7. [Consult. Junho 2020] Disponível em WWW: <URL: <http://sistemasdearmas.com.br/ge/furt04ir.html>>.
8. Avdelidis, N.P. and A. Moropoulou, *Emissivity considerations in building thermography*. Energy and Buildings, 2003. **35**(7): p. 663-667.
9. Maldague, X., *Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation*. http://w3.gel.ulaval.ca/~maldagx/r_1123.pdf.
10. de Freitas, S.S., V.P. de Freitas, and E. Barreira, *Detection of façade plaster detachments using infrared thermography—A nondestructive technique*. Construction and Building Materials, 2014. **70**: p. 80-87.
11. Chew, M., *Assessing building façades using infra-red thermography*. Structural Survey, 1998.
12. Barreira, E. and V.P. de Freitas, *Evaluation of building materials using infrared thermography*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(1): p. 218-224.
13. Lourenço, T., L. Matias, and P. Faria, *Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography*. Construction and Building Materials, 2017. **148**: p. 419-428.
14. Edis, E., I. Flores-Colen, and J. de Brito, *Passive thermographic inspection of adhered ceramic claddings: limitation and conditioning factors*. Journal of performance of constructed facilities, 2013. **27**(6): p. 737-747.
15. Lo, T.Y. and K.T.W. Choi, *Building defects diagnosis by infrared thermography*. Structural Survey, 2004. **22**(5): p. 259-263.
16. Balaras, C.A. and A. Argiriou, *Infrared thermography for building diagnostics*. Energy and buildings, 2002. **34**(2): p. 171-183.
17. Pearson, C.C., *Thermal Imaging of building fabric*. 2011: BSRIA Bracknell, UK.
18. Sundaravalli, S., M. Majumder, and G. Vijayaraghavan, *Modeling and simulation of delaminations in FML using step pulsed active thermography*. Int Sch Sci Res Innov, 2013. **7**(4): p. 288-97.
19. Sun, J.G., *Analysis of Pulsed Thermography Methods for Defect Depth Prediction*. Journal of Heat Transfer, 2006. **128**(4): p. 329-338.
20. Kylili, A., et al., *Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review*. Applied Energy, 2014. **134**: p. 531-549.
21. Mendioroz, A., et al., *Sizing vertical cracks using burst vibrothermography*. NDT & E International, 2016. **84**: p. 36-46.
22. Lerma, C., E. Barreira, and R.M. Almeida, *A discussion concerning active infrared thermography in the evaluation of buildings air infiltration*. Energy and buildings, 2018. **168**: p. 56-66.
23. Washer, G., R. Fenwick, and N. Bolleni, *Effects of solar loading on infrared imaging of subsurface features in concrete*. Journal of Bridge Engineering, 2010. **15**(4): p. 384-390.
24. Świta, R. and Z. Suszyński, *Processing of thermographic sequence using Principal Component Analysis*. Measurement Automation Monitoring, 2015. **61**.

25. Edis, E., I. Flores-Colen, and J. De Brito, *Time-Dependent Passive Building Thermography for Detecting Delamination of Adhered Ceramic Cladding*. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015. **34**(3).
26. Ibarra-Castanedo, C., et al., *Infrared image processing and data analysis*. Infrared Physics & Technology, 2004. **46**(1-2): p. 75-83.
27. Rajic, N., *Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures*. Composite structures, 2002. **58**(4): p. 521-528.
28. Edis, E., I. Flores-Colen, and J. de Brito, *Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis*. Building and Environment, 2015. **94**: p. 97-108.
29. Griefahn, D., J. Wollnack, and W. Hintze, *Principal component analysis for fast and automated thermographic inspection of internal structures in sandwich parts*. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2014. **3**(1): p. 105-111.
30. Grinzato, E., G. Cadelano, and P. Bison, *Moisture map by IR thermography*. Journal of Modern Optics, 2010. **57**(18): p. 1770-1778.
31. Silvestre, J.D. and J. De Brito, *Ceramic tiling in building façades: Inspection and pathological characterization using an expert system*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(4): p. 1560-1571.
32. Vadivambal, R. and D.S. Jayas, *Applications of thermal imaging in agriculture and food industry—a review*. Food and Bioprocess Technology, 2011. **4**(2): p. 186-199.
33. Natephra, W., et al. *Building envelope thermal performance analysis using bim-based 4D thermal information visualization*. in *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Osaka, Japan. 2016.
34. Altoé, L. and D. Oliveira Filho, *Termografia infravermelha aplicada à inspeção de edifícios*. Acta Tecnológica, 2012. **7**(1): p. 55-59.
35. Taylor, T., J. Counsell, and S. Gill, *Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography*. Energy and Buildings, 2013. **66**: p. 222-231.
36. Lahiri, B.B., et al., *Medical applications of infrared thermography: A review*. Infrared Phys Technol, 2012. **55**(4): p. 221-235.
37. Kaczmarek, M., et al. *Infrared thermography: applications in heart surgery*. in *Optoelectronic and Electronic Sensors III*. 1999. International Society for Optics and Photonics.
38. Schaefer, A., et al., *The use of infrared thermography as an early indicator of bovine respiratory disease complex in calves*. Research in Veterinary Science, 2007. **83**(3): p. 376-384.
39. Schaefer, A.L., et al., *The non-invasive and automated detection of bovine respiratory disease onset in receiver calves using infrared thermography*. Res Vet Sci, 2012. **93**(2): p. 928-35.
40. Rekant, S.I., et al., *Veterinary applications of infrared thermography*. American journal of veterinary research, 2016. **77**(1): p. 98-107.
41. Harper, D.L., *The value of infrared thermography in the diagnosis and prognosis of injuries in animals*. Proceedings of Inframation, 2000: p. 115-122.
42. Berlin, G.L., et al., *Identification of a Sinagua agricultural field by aerial thermography, soil chemistry, pollen/plant analysis, and archaeology*. American Antiquity, 1977. **42**(4): p. 588-600.
43. Menesatti, P., et al., *Thermography to analyze distribution of agricultural sprayers*. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2008. **5**(1): p. 81-96.
44. Costa, J.M., O.M. Grant, and M.M. Chaves, *Thermography to explore plant-environment interactions*. J Exp Bot, 2013. **64**(13): p. 3937-49.
45. Pregowski, P. and W. Swiderski. *Detection of minefields using IR sensing and time-domain treatment method*. in *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets II*. 1997. International Society for Optics and Photonics.
46. Rajic, N., D. Rowlands, and K. Tsoi. *An Australian perspective on the application of infrared thermography to the inspection of military aircraft*. in *2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010*. 2010.
47. Thomas, H., *Some like it hot: The impact of next generation FLIR Systems thermal cameras on archaeological thermography*. Archaeological Prospection, 2018. **25**(1): p. 81-87.

48. Chou, Y.-C. and L. Yao, *Automatic Diagnostic System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography*, in *2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition*. 2009. p. 155-160.
49. Huda, A.S.N. and S. Taib, *Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment*. *Applied Thermal Engineering*, 2013. **61**(2): p. 220-227.
50. Barreira, E., R.M.S.F. Almeida, and J.M.P.Q. Delgado, *Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components*. *Construction and Building Materials*, 2016. **110**: p. 251-269.
51. Melrinho, A., L. Matias, and P. Faria, *Deteção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço através da termografia de infravermelhos*. *Tech ITT*, 2015. **13**(37): p. 29-38.
52. Grinzato, E., V. Vavilov, and T. Kauppinen, *Quantitative infrared thermography in buildings*. *Energy and Buildings*, 1998. **29**(1): p. 1-9.
53. Edis, E., I. Flores-Colen, and J. De Brito, *Building thermography: detection of delamination of adhered ceramic claddings using the passive approach*. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2015. **34**(1): p. 268.
54. Edis, E., I. Flores-Colen, and J. de Brito, *Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding*. *Construction and Building Materials*, 2014. **51**: p. 187-197.
55. Bauer, E., et al., *Infrared thermography – evaluation of the results reproducibility*. *Structural Survey*, 2015. **33**(1): p. 20-35.
56. Asdrubali, F., G. Baldinelli, and F. Bianchi, *A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings*. *Applied Energy*, 2012. **97**: p. 365-373.
57. Ortiz-Sanz, J., et al., *IR Thermography from UAVs to Monitor Thermal Anomalies in the Envelopes of Traditional Wine Cellars: Field Test*. *Remote Sensing*, 2019. **11**(12).
58. Colantonio, A. *Infrared thermographic investigation procedures for four types of generic exterior wall assemblies*. in *Thermosense XXI*. 1999. International Society for Optics and Photonics.
59. Barreira, E., R.M.S.F. Almeida, and M. Moreira, *An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings*. *Energy and Buildings*, 2017. **140**: p. 224-235.
60. Finn, M.A., *The Use of Infrared Thermal Imaging in Indoor Environmental Investigations*. 2004, ITC-Infrared Training Center, InfraMation.
61. Nardi, I., S. Sfarra, and D. Ambrosini. *Quantitative thermography for the estimation of the U-value: state of the art and a case study*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. IOP Publishing.
62. Nardi, I., et al., *U-value assessment by infrared thermography: A comparison of different calculation methods in a Guarded Hot Box*. *Energy and Buildings*, 2016. **122**: p. 211-221.
63. Fokaides, P.A. and S.A. Kalogirou, *Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes*. *Applied Energy*, 2011. **88**(12): p. 4358-4365.
64. Adhikari, R.S., E. Lucchi, and V.N. Pracchi. *Experimental measurements on thermal transmittance of the opaque vertical walls in the historical buildings*. in *28TH INTERNATIONAL PLEA CONFERENCE ON SUSTAINABLE ARCHITECTURE+ URBAN DESIGN*. 2012.
65. Lehmann, B., et al., *Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings*. *Applied Energy*, 2013. **110**: p. 29-43.
66. Dall'O, G., L. Sarto, and A. Panza, *Infrared screening of residential buildings for energy audit purposes: results of a field test*. *Energies*, 2013. **6**(8): p. 3859-3878.
67. Grinzato, E., et al. *R-value estimation by local thermographic analysis*. in *Thermosense XXXII*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
68. Avdelidis, N.P. and A. Moropoulou, *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*. *Journal of Cultural Heritage*, 2004. **5**(1): p. 119-127.
69. Maierhofer, C. and M. Röllig. *Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures*. in *Proceedings of the 7th International Symposium on Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE)*, Nantes, France. 2009. Citeseer.

70. Grinzato, E., P. Bison, and S. Marinetti, *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*. Journal of Cultural Heritage, 2002. **3**(1): p. 21-29.
71. Grinzato, E., et al., *Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared*. Infrared Physics & Technology, 2002. **43**(3-5): p. 165-169.
72. Watts, A.C., V.G. Ambrosia, and E.A. Hinkley, *Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use*. Remote Sensing, 2012. **4**(6): p. 1671-1692.
73. Hassanalain, M. and A. Abdelkefi, *Classifications, applications, and design challenges of drones: A review*. Progress in Aerospace Sciences, 2017. **91**: p. 99-131.
74. DJI - The World Leader in Camera Drones 2006. [Consult. Abril 2020] Disponível em WWW: <URL: <https://www.dji.com/pt/phantom-2>>.
75. FLIR Systems, Inc - The World's Sixth Sense 1978. [Consult. Abril 2020] Disponível em WWW: <URL: <https://www.flir.com/products/vue-pro-r/>>.
76. Liu, F. and S. Seipel, *Infrared-visible image registration for augmented reality-based thermographic building diagnostics*. Visualization in Engineering, 2015. **3**(1).
77. Esri: Software de Mapeamento SIG 1969. [Consult. Abril 2020] Disponível em WWW: <URL: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=6dcd725b0e8f4170b9de4e3e52f2e741>>.
78. Marinello, F., et al., *Technical analysis of unmanned aerial vehicles (drones) for agricultural applications*. Engineering for Rural Development, 2016. **15**.
79. Entrop, A. and A. Vasenev, *Infrared drones in the construction industry: designing a protocol for building thermography procedures*. Energy procedia, 2017. **132**: p. 63-68.
80. Muntwyler, U., E. Schuepbach, and M. Lanz. *Infrared (IR) drone for quick and cheap PV inspection*. in *Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. 2015.
81. García Márquez, F.P. and I. Segovia Ramírez, *Condition monitoring system for solar power plants with radiometric and thermographic sensors embedded in unmanned aerial vehicles*. Measurement, 2019. **139**: p. 152-162.
82. Pinceti, P., et al. *Using drone-supported thermal imaging for calculating the efficiency of a PV plant*. in *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC/IE&CPS Europe)*. 2019. IEEE.
83. Lega, M., et al., *Using Advanced Aerial Platforms and Infrared Thermography to Track Environmental Contamination*. Environmental Forensics, 2012. **13**(4): p. 332-338.
84. Gonzalez-Dugo, V., et al., *Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard*. Precision Agriculture, 2013. **14**(6): p. 660-678.
85. Gonzalez-Dugo, V., P.J. Zarco-Tejada, and E. Fereres, *Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards*. Agricultural and Forest Meteorology, 2014. **198-199**: p. 94-104.
86. Maes, W., A. Huete, and K. Steppe, *Optimizing the Processing of UAV-Based Thermal Imagery*. Remote Sensing, 2017. **9**(5).
87. Abram, B., *Metodologia de Inspeção termográfica por camera em drone para detectar entrada falsa de ar em dutos de gás entre caldeira e precipitador eletrostático*.
88. Rakha, T., et al., *Heat Mapping Drones: An Autonomous Computer-Vision-Based Procedure for Building Envelope Inspection Using Unmanned Aerial Systems (UAS)*. Technology|Architecture + Design, 2018. **2**(1): p. 30-44.
89. Rakha, T. and A. Gorodetsky, *Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones*. Automation in Construction, 2018. **93**: p. 252-264.
90. Han, D. and J. Huh. *Thermal Data Fusion for Building Insulation*. in *2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. 2019. IEEE.
91. Gu, N. and K. London, *Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry*. Automation in Construction, 2010. **19**(8): p. 988-999.

92. Smith, P., *BIM & the 5D Project Cost Manager*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2014. **119**: p. 475-484.
93. Pérez-Lombard, L., J. Ortiz, and C. Pout, *A review on buildings energy consumption information*. Energy and buildings, 2008. **40**(3): p. 394-398.
94. *World Highways*. [Consult. Junho 2020] Disponível em WWW: <URL: <https://www.worldhighways.com/wh1/products/accurate-laser-scanning-leica-geosystems> >.
95. Luís Sanhudo, et al., *TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO LASER SCANNER -APLICABILIDADE AO CONTEXTO DOS EDIFÍCIOS*. 2018.
96. Lagüela, S., et al., *Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes*. Automation in Construction, 2013. **31**: p. 230-240.
97. Schreyer, A.C. and S. Hoque, *Interactive three-dimensional visualization of building envelope systems using infrared thermography and SketchUp*. Proc. of InfraMation, Available online: <http://bct.eco.umass.edu/wp-content/uploads/2009/07/2009-029-Schreyer.pdf> Representation of Thermal Building Simulation in Virtual Reality for Sustainable Building Page, 2009. **177**.
98. González-Aguilera, D., et al., *Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades*. Energy and Buildings, 2013. **65**: p. 29-36.
99. Golparvar-Fard, M. and Y. Ham, *Automated Diagnostics and Visualization of Potential Energy Performance Problems in Existing Buildings Using Energy Performance Augmented Reality Models*. Journal of Computing in Civil Engineering, 2014. **28**(1): p. 17-29.
100. Electromagnetico, E.
101. Lagüela, S., et al., *Non-destructive approach for the generation and thermal characterization of an as-built BIM*. Construction and Building Materials, 2014. **51**: p. 55-61.
102. Burdea, G.C. and P. Coiffet, *Virtual reality technology*. 2003: John Wiley & Sons.
103. Samsung. [Consult. Abril 2020] Disponível em WWW: <URL: <https://www.samsung.com/pt/wearables/gear-vr-r325/SM-R325NZVCTPH/>>.
104. Azuma, R., et al., *Recent advances in augmented reality*. IEEE computer graphics and applications, 2001. **21**(6): p. 34-47.
105. *Colocation America: Dedicated Servers and Colocation Services 2000*. [Consult. Abril 2020] Disponível em WWW: <URL: <https://www.colocationamerica.com/blog/history-of-augmented-reality>>.
106. Lahoud, F. and S. Susstrunk. *Ar in vr: Simulating infrared augmented vision*. in 2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2018. IEEE.
107. BIMserver.center AR. [Consult. Abril 2020] Disponível em WWW: <URL: <https://blog.bimserver.center/pt/modelos-do-cypecad-em-realidade-aumentada-com-o-bimserver-center-ar%E2%80%8B/>>.
108. Cifuentes, I.J., et al., *Augmented reality and dynamic infrared thermography for perforator mapping in the anterolateral thigh*. Arch Plast Surg, 2018. **45**(3): p. 284-288.
109. El Ammari, K. and A. Hammad, *Remote interactive collaboration in facilities management using BIM-based mixed reality*. Automation in Construction, 2019. **107**.
110. Ham, Y. and M. Golparvar-Fard, *An automated vision-based method for rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery*. Advanced Engineering Informatics, 2013. **27**(3): p. 395-409.
111. Ham, Y. and M. Golparvar-Fard, *Identification of potential areas for building retrofit using thermal digital imagery and CFD models*, in *Computing in Civil Engineering (2012)*. 2012. p. 642-649.
112. Ham, Y. and M. Golparvar-Fard. *Automated cost analysis of energy loss in existing buildings through thermographic inspections and CFD analysis*. in *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2013. IAARC Publications.
113. de Queiróz, G.R., et al., *Autodesk Revit® como ferramenta BIM aplicada à simulação térmica de edificações*. Revista de Arquitetura IMED, 2016. **4**(2): p. 33-41.

114. Raimbaud, P., et al. *BIM-based Mixed Reality Application for Supervision of Construction*. in *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. 2019. IEEE.
115. Borrmann, D., et al., *A mobile robot based system for fully automated thermal 3D mapping*. *Advanced Engineering Informatics*, 2014. **28**(4): p. 425-440.