

AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS ASSOCIADA A DRONES PARA A INSPEÇÃO DIGITAL DE EDIFÍCIOS

RUI ANDRÉ ALMEIDA E MAGALHÃES

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

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Doutor João Pedro da Silva Poças Martins

JUNHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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 - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.*

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, Irmãos, Namorada e Amigos

“Não tenhamos pressa, mas não percamos tempo”

José Saramago

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente à minha orientadora, Professora Eva Sofia Botelho Machado Barreira, pelo ótimo profissionalismo, por todo o auxílio disponibilizado, instrução, foco, interesse, confiança e boa disposição, a qual foi essencial e exemplar para conseguir desenvolver este trabalho.

Uma palavra de apreço ao meu coorientador, Professor João Pedro da Silva Poças Martins, pela rápida disponibilidade, conhecimento transmitido e apoio prestado, o que permitiu também uma mais rápida adaptação ao drone.

Quero também agradecer aos meus pais, irmão e irmã, por toda a paciência ao longo destes anos, preocupação, apoio incondicional, motivação e por serem um pilar para mim. Um especial destaque para o meu pai e engenheiro, Rui António Fernandes Magalhães, por toda a sabedoria, pela partilha de experiências e pela confiança que depositou em mim.

De seguida, agradeço à minha namorada Rita Santos por ter aceitado a gigante tarefa de rever toda a dissertação, pela resiliência, pelas palavras especiais e carinhosas que sempre teve para comigo quando mais precisei e por ter estado sempre presente nos bons e maus momentos.

Por último, quero agradecer aos meus amigos de longa data, aos meus amigos de curso mais próximos e à minha madrinha e irmã de praxe por todos os conselhos dados, ajuda e pelos bons momentos que me proporcionaram.

RESUMO

Através de técnicas de levantamento é possível criar modelos geométricos da condição atual dos edifícios em forma de nuvens de pontos e importá-los para as ferramentas BIM. Com base na fotogrametria, a metodologia Structure from Motion (SfM) permite obter reconstruções tridimensionais de forma automática, rápida e barata.

Com a evolução tecnológica, aeronaves não tripuladas (drones) operadas remotamente permitem aceder a locais inacessíveis ou remotos em segurança. A diminuição do tamanho, custo e aumento da qualidade de câmaras RGB e termográficas de infravermelhos permite que estas se conjuguem com os drones e comecem a ganhar interesse na indústria da construção.

Entender a versatilidade dos drones com câmara de infravermelhos para a engenharia civil, a sua potencial aplicação na área energética para conjugação com ferramentas BIM e a criação de uma metodologia para realizar levantamentos termográficos com drones são os objetivos principais desta dissertação.

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa sobre BIM, reconstrução tridimensional e termografia. Esta pesquisa incidiu sobre definições, vantagens, desvantagens, fatores condicionantes e trabalhos já realizados que possuem relevância para o trabalho desenvolvido. De seguida, com recurso aos equipamentos *DJI Mavic 2 Enterprise Dual* e a *Fluke TSI60+*, analisaram-se as capacidades de cada um destes, simulou-se um caso de estudo para identificar a emissividade do drone e desenvolveu-se uma comparação de imagem dos termogramas entre estes dois. Por fim, testaram-se também os vários fatores condicionantes que podem afetar um levantamento termográfico com um drone. Com os resultados obtidos e a metodologia proposta, realizou-se um levantamento final e comparou-se também o tempo de reconstrução entre o modelo RGB e térmico. O modelo 3D final obtido foi bastante satisfatório, principalmente com o uso da tecnologia de fusão do visível com infravermelho do drone.

Com esta análise de sensibilidade pretende-se que a metodologia de levantamento proposta optimize os levantamentos termográficos a realizar e que o uso dos drones com câmara termográfica e RGB seja visto como ferramenta válida e útil na indústria da construção.

PALAVRAS-CHAVE: Drones, Termografia de Infravermelhos, Structure from Motion, Modelos 3D, BIM

ABSTRACT

Through survey techniques it is possible to create geometric models of the current condition of buildings in the form of point clouds and import them into the BIM tools. Based on photogrammetry, the Structure from Motion (SfM) methodology allows you to quickly obtain three-dimensional reconstructions automatically and inexpensively.

With technological developments, remotely operated unmanned aircraft (drones) allow access to inaccessible or remote locations safely. The decrease in size, cost and increase in the quality of RGB and infrared thermographic cameras allows them to combine with drones and start gaining interest in the construction industry.

Understand the versatility of drones with infrared camera for civil engineering, their potential application in the energy area for conjugation with BIM tools and the creation of a methodology for conducting thermographic surveys with drones are the main objectives of this dissertation.

First, a research on BIM, three-dimensional reconstruction and thermography was carried out. This research focused on definitions, advantages, disadvantages, conditioning factors and work already carried out that have relevance to the work developed. Then, using the *DJI Mavic 2 Enterprise Dual* equipment and the *Fluke TSI60+*, the capabilities of each of these were analyzed, a case study was simulated to identify the emissivity of the drone and an image comparison of the thermograms was developed between these two. Finally, the various conditioning factors that may affect a thermographic survey with a drone were also tested. With the results obtained and the proposed methodology, a final survey was carried out and the reconstruction time between the RGB and thermal model was also compared. The final 3D model obtained was quite satisfactory, mainly with the use of fusion technology of the visible with infrared of the drone.

With this sensitivity analysis it is intended that the proposed survey methodology optimizes the thermographic surveys to be carried out and that the use of drones with thermographic camera and RGB is seen as a valid and useful tool in the construction industry.

KEYWORDS: Drones, Infrared Thermography, Structure from Motion, 3D Models, BIM

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. INTERESSES E OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. TÉCNICAS E METODOLOGIAS PARA A MODELAÇÃO 3D	5
2.1. BUILDING INFORMATION MODELING	5
2.1.1. DEFINIÇÃO E HISTÓRIA	5
2.1.2. DE 3D A 8D BIM	7
2.1.3. VANTAGENS DA IMPLEMENTAÇÃO DO BIM	8
2.1.4. DESAFIOS À IMPLEMENTAÇÃO DO BIM	11
2.2. RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL	12
2.2.1. BIM E EDIFÍCIOS EXISTENTES	12
2.2.2. TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO	14
2.2.3. FOTOGRAMETRIA	15
2.2.4. STRUCTURE FROM MOTION	18
2.3. TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS	21
2.3.1. DEFINIÇÃO E HISTÓRIA	21
2.3.2. PRINCÍPIOS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS	23
2.3.3. FATORES QUE AFETAM A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS	24
2.3.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS	25
2.3.5. TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS E MODELAÇÃO 3D	26
3. DRONES NA INSPEÇÃO E MODELAÇÃO 3D DE EDIFÍCIOS	29
3.1. DRONES	29

3.1.1. DEFINIÇÃO E POTENCIALIDADES	29
3.1.2. RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL A PARTIR DE DRONES	32
3.1.3. DRONES DISPONÍVEIS NO MERCADO.....	35
3.2. LEGISLAÇÃO DRONES.....	36
4. METODOLOGIA DE ENSAIO E TRATAMENTO DE DADOS	41
4.1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO.....	41
4.2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	42
4.3. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	46
4.3.1. TESTE 1	46
4.3.2. TESTE 2	46
4.3.2. TESTE 3	47
5. RESULTADOS	53
5.1. TESTE 1	53
5.2. TESTE 2.....	54
5.3. TESTE 3	60
5.4. LEVANTAMENTO FINAL.....	66
5.5. METODOLOGIA PARA EFETUAR UM LEVANTAMENTO TERMOGRÁFICO COM DRONES	71
6. CONCLUSÕES	73
6.1. CONCLUSÕES FINAIS	73
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXOS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Forma ótima de trabalhar num modelo BIM, adaptado de [5]	6
Figura 2 – BIM enquanto tecnologia, adaptado de [1]	6
Figura 3 – Diferenças entre o processo BIM e o processo tradicional, adaptado de [1]	7
Figura 4 – Classificação do BIM 3D a 8D [7]	8
Figura 5 – Poupança estimada através de uso do BIM na fase de projeto para uma construção na Geórgia, adaptado de [6].....	9
Figura 6 – Análise do retorno no investimento do BIM, adaptado de [6]	10
Figura 7 – Vantagens da implementação do BIM: a) os vários intervenientes comunicam entre si num só local; b) exemplo de modelo com as várias especialidades, adaptado de [2]	11
Figura 8 – Exemplos de ferramentas BIM [11].....	13
Figura 9 – Técnicas de levantamento: a) estação total robotizada; b) câmara termográfica, adaptado de [11].....	15
Figura 10 – Comparação de várias técnicas de levantamento em relação à escala e complexidade do objeto, adaptado de [11].....	15
Figura 11 – Câmara Digital	16
Figura 12 – Tipos de reconstituição: a) monorreconstituição; b) estereorreconstituição; c) reconstituição de múltiplas fotografias convergentes, adaptado de [11]	17
Figura 13 – Representação das perspetivas de acordo com a posição e ângulo da lente da câmara fotográfica, adaptado de [14].....	17
Figura 14 – Linha de trabalho para se obter uma reconstrução tridimensional, adaptado de [17]	19
Figura 15 – Algoritmos e métodos usados para gerar nuvens de pontos, adaptado de [17]	20
Figura 16 – Algoritmos e métodos usados para processar nuvens de pontos, adaptado de [17].....	20
Figura 17 – Procedimento para captar informação: a) de um edifício; b) de uma fachada; c) do interior de um edifício, adaptado de [11]	21
Figura 18 – Exemplos de imagens termográficas em edifícios [11]	22
Figura 19 – Aplicação da termografia na: a) monitorização do impacto dos equipamentos de ar condicionado nas temperaturas superficiais; b) e c) avaliação do desempenho energético antes e após reabilitação, adaptado de [11, 26].....	23
Figura 20 – Espectro eletromagnético, adaptado de [19].....	23
Figura 21 – Variação da emissividade em função do ângulo de observação para alguns não metais: madeira (1); papel (2); vidro (3) [24]	24
Figura 22 – Variação da emissividade em função do ângulo de observação para alguns metais: níquel polido (1); níquel baço (2); crómio (3); alumínio (4) [24].....	24
Figura 23 – Efeitos que intervêm na medição da radiação infravermelha [24].....	25
Figura 24 – Metodologia proposta para gerar um modelo 3D texturizado, adaptado de [29]	26

Figura 25 – Modelos BIM finais: a) sem texturas; b) texturizado com ortofotografias; c) texturizado com orto termogramas, adaptado de [29]	27
Figura 26 – Orto termograma do interior de um hall visto de fora [28]	27
Figura 27 – Tipos de drones, adaptado de [31]	29
Figura 28 – Categorias dos drones [33]	30
Figura 29 – Métodos de levantamento terrestre vs. levantamento com drone, adaptado de [36]	30
Figura 30 – Levantamento topográfico com recurso a um drone, adaptado de [31]	31
Figura 31 – Fluxograma de monitorização da evolução da obra através do uso de nuvens de pontos captadas com drone e um modelo BIM, adaptado de [31]	31
Figura 32 – Captação de termogramas para deteção de potenciais áreas de delaminação com um drone, adaptado de [32]	32
Figura 33 – Modelos termográficos obtidos pelos programas: a) <i>Agisoft Photoscan</i> ; b) <i>Pix4D</i> ; c) <i>DroneDeploy</i> , adaptado de [35]	34
Figura 34 – Modelo 3D obtido com o <i>Pix4D</i> , adaptado de [41]	34
Figura 35 – Modelo 3D da cidade de Loulé [42]	35
Figura 36 – Operações em categoria aberta, adaptado de [55]	37
Figura 37 – Drones sem certificação durante o período de transição [52]	38
Figura 38 – Aplicação <i>Voa na Boa</i> : a) mapa com as áreas geográficas; b) instruções de como proceder para uma área sob jurisdição militar	40
Figura 39 – Caso de estudo	41
Figura 40 – Câmara termográfica <i>Fluke TIS60+</i>	42
Figura 41 – Drone <i>DJI Mavic 2 Enterprise Dual</i>	43
Figura 42 – Paletes de cor: a) drone; b) câmara da <i>Fluke</i>	44
Figura 43 – Resposta dada pela <i>DJI</i>	45
Figura 44 – Paleta de cor: a) “Rainbow”; b) “High Contrast”	45
Figura 45 – Esquema dos ensaios do Teste 1	46
Figura 46 – Esquema dos ensaios do Teste 2	47
Figura 47 – Ferramenta de voo automático “Oblique” da aplicação <i>DJI Pilot</i>	48
Figura 48 – Rota: a) oblíqua (C20); b) elíptica (C21)	49
Figura 49 – Rota elíptica para os ensaios C1-13 e C22-C27	49
Figura 50 – Mapa de obstáculos existentes dentro do raio de voo	50
Figura 51 – Esquema dos ensaios do Teste 3	51
Figura 52 – Ensaio E1: a) área de estudo; b) termograma drone; c) termograma câmara <i>Fluke</i>	53
Figura 53 – Ensaio E2: a) área de estudo; b) termograma drone; c) termograma câmara <i>Fluke</i>	53
Figura 54 – Ensaio E3: a) área de estudo; b) termograma drone; c) termograma câmara <i>Fluke</i>	53

Figura 55 – Área de estudo para o Teste 2	54
Figura 56 – Termograma obtido no ensaio QM1 com: a) drone; b) câmara da <i>Fluke</i>	55
Figura 57 – Termograma obtido no ensaio QM2 com: a) drone; b) câmara da <i>Fluke</i>	55
Figura 58 – Termograma obtido no ensaio QM3 com: a) drone; b) câmara da <i>Fluke</i>	55
Figura 59 – Termograma obtido no ensaio QM4 com: a) drone; b) câmara da <i>Fluke</i>	55
Figura 60 – Histograma do termograma para o ensaio QM1: a) da câmara da <i>Fluke</i> ; b) do drone.....	57
Figura 61 – Histograma do termograma para o ensaio QM2: a) da câmara da <i>Fluke</i> ; b) do drone.....	57
Figura 62 – Histograma do termograma para o ensaio QM3: a) da câmara da <i>Fluke</i> ; b) do drone.....	57
Figura 63 – Histograma do termograma para o ensaio QM4: a) da câmara da <i>Fluke</i> ; b) do drone.....	58
Figura 64 – Gráfico das frequências acumuladas para o ensaio QM1: a) da câmara da <i>Fluke</i> ; b) do drone	58
Figura 65 – Termograma obtido com a câmara da <i>Fluke</i> para os ensaios QM5-8	58
Figura 66 – Termogramas obtidos com drone para o ensaio: a) QM5; b) QM6; c) QM7; d) QM8	59
Figura 67 – Nuvem de pontos gerada para: a) céu limpo (C1); b) céu nublado (C2); c) vento forte (C3)	61
Figura 68 – Termograma captado para as: a) 16 horas (C4); b) 12 horas (C8).....	61
Figura 69 – Nuvem de pontos gerada para as: a) 16 horas (C4); b) 20 horas (C5); c) 23 horas e 30 minutos (C6); d) 7 horas (C7); e) 12 horas (C8)	62
Figura 70 – Nuvem de pontos gerada para a paleta de cor: a) “Rainbow (C9); b) “HotSpot” (C10); c) “Gray” (C11); d) “HotMetal” (C12); e) “ColdSpot” (C13).....	62
Figura 71 – Nuvem de pontos gerada para sobreposição de: a) 70% (C14); b) 80% (C15); c) 90% (C16)	63
Figura 72 – Nuvem de pontos gerada para inclinação do gimbal de: a) 70° (C17); b) 55° (C18); c) 40° (C19).....	64
Figura 73 – Malha gerada para inclinação do gimbal de: a) 70° (C17); b) 55° (C18).....	64
Figura 74 – Nuvem de pontos gerada para uma rota: a) oblíqua (C20); b) elíptica (C21)	65
Figura 75 – Nuvem de pontos gerada para gama de RGB: a) a 2/3 (C22); b) a 1/3 (C23); c) no mínimo (C24).....	65
Figura 76 – Nuvem de pontos gerada para escala de temperatura fixa de: a) 5°C a 38°C (C25); b) 0°C a 24°C (C26); c) -10°C a 30°C (C27)	66
Figura 77 – Condição meteorológica para o levantamento final.....	66
Figura 78 – Modo oblíquo: a) área selecionada para o levantamento; b) trajeto para mapeamento....	67
Figura 79 – Trajeto oblíquo para a fachada a: a) sudeste; b) sudoeste; c) noroeste; d) nordeste	67
Figura 80 – Medição da temperatura máxima e mínima com o drone	67
Figura 81 – Nuvem de pontos final com infravermelhos.....	68
Figura 82 – Nuvem de pontos final com MSX.....	68

Figura 83 – Nuvem de pontos final com RGB.....	69
Figura 84 – Malha final com infravermelho das fachadas a sudoeste e a noroeste.....	70
Figura 85 – Malha final com infravermelho das fachadas a sudeste e a nordeste.....	70
Figura 86 – Malha final com MSX das fachadas a sudoeste e a noroeste.....	70
Figura 87 – Malha final com MSX das fachadas a sudeste e a nordeste.....	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Drones para trabalhos na área da engenharia civil	36
Tabela 2 – Valores da temperatura superficial para os ensaios do Teste 1	54
Tabela 3 – Valores médios da temperatura superficial para os ensaios QM1-4 do Teste 2	56
Tabela 4 – Valores médios da temperatura superficial para os ensaios QM5-8 do Teste 2	59
Tabela 5 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência das condições climáticas	60
Tabela 6 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da radiação solar	61
Tabela 7 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da paleta de cores	62
Tabela 8 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da sobreposição de imagens	63
Tabela 9 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da inclinação do gimbal	63
Tabela 10 – Número de faces e vértices gerados na malha para avaliar a influência da inclinação do gimbal	64
Tabela 11 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da rota de voo	64
Tabela 12 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da fusão do visível com os infravermelhos	65
Tabela 13 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência do uso de escala de temperatura fixa	66

SÍMBOLOS

E - radiação emitida [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

ε - emissividade (-)

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

T - temperatura (K)

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

2D - Duas Dimensões

3D - Três Dimensões

4D - Quatro Dimensões

5D - Cinco Dimensões

6D - Seis Dimensões

7D - Sete Dimensões

8D - Oito Dimensões

AEC - Architecture, Engineering and Construction

ANAC - Autoridade Nacional da Aviação Civil

AAN - Autoridade Aeronáutica Nacional

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

B-rep - Boundary Representation

BIM - Building Information Modeling

CAD - Computer Aided Design

CIA – Circular de Informação Aeronáutica

CIFE - Center for Integrated Facility Engineering

CMM - Coordinated Measuring Machine

CSG - Constructive Solid Geometry

CSV - Comma-separated values

FPV - First Person View

GNSS - Global Navigation Satellite System

HD - High Definition

IDM - Information Delivery Manual

IFC - Industry Foundation Classes

IPD - Integrated Project Delivery

IS2 – Input-Screen 2

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

JPEG - Joint Photographic Experts Group

LIDAR - Light Detection and Ranging

LoD - Level of Development

MDV - Model View Definition

MSX - Multi-Spectral Dynamic Imaging

MTOM - Maximum Takeoff Mass

PNG - Portable Network Graphics

RAM – Random Access Memory

RGB - Red, Green and Blue

SfM - Structure from Motion

TOM - Take off Mass

UAS - Unmanned Aerial Systems

UAV - Unmanned Aerial Vehicle

VANT - Veículos Aéreos Não Tripulados

VLOS - Visual Line of Sight

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A indústria da construção é um esquema de produção não repetitivo com número elevado de operacionais e grande dependência no desenvolvimento de cada atividade. Por esta razão, muitas vezes há dificuldade em compreender as especificidades de cada atividade por elementos da equipa envolvido noutras especialidades. Em adição, o setor da construção representa 40% do consumo total de energia na União Europeia e cada vez mais os países procuram responder aos problemas de produtividade e eficiência no setor da construção, bem como aos desafios ambientais e consequentes exigências energéticas.

Muitas das deficiências existentes na construção devem-se à conceção inicial desajustada aos objetivos, a projetos deficientes, seleção de materiais inadequada, execução, utilização e manutenção incorreta. O cliente também é frequentemente ignorado. No entanto, um cliente envolvido na equipa é essencial e pode ter um impacto positivo, já que há possibilidade de este ser um fator de importância na pesquisa e identificação de soluções inovadoras e/ou mais eficientes.

O conceito *Lean Construction* tem como objetivo ser eficiente, produtivo, regrado, pensado, racional e redutor ou abolidor das fases que acarretam desperdícios. A adoção de *Building Information Modeling* (BIM) e das suas ferramentas oferece o potencial de ser um passo importante para alcançar os objetivos da *Lean Construction*.

BIM tem como objetivo a integração de todos os intervenientes durante todo o ciclo de vida de um edifício. A utilização destas ferramentas possibilitará melhorar os processos através de uma gestão mais eficiente, integrar equipas, garantir maior segurança nas tarefas, reduzir custos, erros, atrasos, ajudar na tomada de decisões e garantir uma maior qualidade do produto final. Contudo, existem ainda bastantes desafios relativos à sua implementação, pois esta envolve uma reestruturação dos processos tradicionais da construção. BIM é muitas vezes visto apenas como software e a inércia por parte dos intervenientes ainda é grande, principalmente nas fases de pós construção.

A maioria dos edifícios existentes não possui um modelo BIM. Muita da informação destes é omitida, não existe ou a que existe não coincide com o estado atual do edifício. Através de técnicas de levantamento é possível criar modelos geométricos da condição atual dos edifícios em forma de nuvens de pontos e importar para as ferramentas BIM. Assim, reabilitações, reestruturações, inspeções e análises energéticas ganham outra dimensão e podem ser também mais eficientes e interativas.

Com base na fotogrametria, a metodologia *Structure from Motion* (SfM) permite obter reconstruções tridimensionais de forma automática, rápida e barata. Os softwares desta metodologia, além de permitirem criar os modelos tridimensionais, também permitem o seu processamento (semiautomático).

Desta forma, é possível fazer o preenchimento de vazios, filtragem ou decimação da malha e corrigir a escala do modelo.

Com a evolução tecnológica, aeronaves não tripuladas (drones) operadas remotamente permitem aceder a locais inacessíveis ou remotos em segurança. A diminuição do tamanho, custo e aumento da qualidade de câmaras RGB e termográficas de infravermelhos permite que estas se conjuguem com os drones e comecem a ganhar interesse na indústria da construção. A obtenção de modelos 3D através de imagens RGB e termográficas é cada vez mais um campo de maior interesse e com um enorme potencial, principalmente na área da reabilitação e eficiência energética.

1.2. INTERESSES E OBJETIVOS DO TRABALHO

A utilização de drones com câmaras RGB para mapeamento, levantamentos topográficos e reconstruções tridimensionais de edifícios é uma alternativa já disponível no mercado com provas dadas da sua eficiência em áreas como a arqueologia, estando também a crescer na engenharia civil. Porém, o uso de câmaras termográficas em drones é geralmente realizado para operações que uma câmara termográfica de infravermelhos terrestre não consegue alcançar ou a operação pode colocar em risco os operadores. Contudo, a metodologia SfM permite também criar modelos tridimensionais termográficos.

Neste sentido, um dos objetivos do trabalho é entender as diferenças entre o drone a utilizar e uma câmara termográfica de infravermelhos terrestre corrente através de uma simulação de um caso de estudo. Pretende-se fazer uma análise de sensibilidade das condições ideais de voo, dos fatores e parâmetros que potenciam os melhores resultados para se obter um modelo 3D termográfico sem a necessidade de recorrer a um levantamento com câmara RGB. Será feito também um levantamento com a câmara RGB do drone apenas para se documentar o processo e os tempos necessários para se criar o mesmo modelo 3D. Estes estudos e análises de sensibilidade têm como objetivo principal entender a versatilidade dos drones com câmara de infravermelhos para a engenharia civil, a sua potencial aplicação na área energética para conjugação com ferramentas BIM e a criação de uma metodologia para realizar levantamentos termográficos com drones.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação divide-se em 6 capítulos:

- No primeiro capítulo (capítulo 1) é apresentada uma introdução do tema abordado, os interesses, objetivos do trabalho a desenvolver e a estrutura da dissertação;
- No capítulo 2 são descritas as técnicas e metodologias necessárias de compreender para efetuar uma reconstrução tridimensional de um modelo térmico. Este capítulo subdivide-se em 3 temas principais: BIM, reconstrução 3D e termografia. No primeiro tema é feita uma introdução ao tema BIM, começando pela sua definição e história. De seguida são descritas as vantagens e desafios à implementação do BIM na construção. Na segunda parte deste capítulo é feita uma ligação do BIM aos edifícios existentes, onde se referem os campos potenciais do uso de ferramentas BIM nas fases de pós construção e numa perspetiva “as-in”. São descritos os tipos de técnicas de levantamento existentes e os fatores a ter em conta na escolha do método. Posteriormente, fala-se da fotogrametria, onde é abordada a sua definição, história, os princípios de funcionamento, a aplicação nas várias áreas e as vantagens do uso desta técnica. Por último, é descrita a metodologia SfM usada para reconstruções tridimensionais e os fatores que condicionam a mesma. A terceira parte deste capítulo é relativa à termografia de infravermelhos, onde se aborda a sua definição, história e são explicados de forma mais sucinta os princípios da

termografia de infravermelhos. Para um uso correto desta técnica são mencionados os vários fatores que podem condicionar as leituras e referidas as respetivas vantagens e desvantagens. Por último, é feita uma análise do pontencial uso de termogramas nos modelos BIM;

- O capítulo 3 aborda os drones, que podem ser usados como ferramentas na inspeção digital e modelação de edifícios. São referidos os tipos de drones existentes, o porquê de serem relevantes na área da engenharia civil e é feito um resumo dos drones mais usados e com características ideais adequadas à mesma área. É ainda mencionada e resumida toda a legislação pertinente e procedimentos legais a tomar para o uso legal e correto dos drones;
- No capítulo 4 é abordada toda a metodologia de ensaio e tratamento de dados desenvolvida para a realização do trabalho prático. É descrito o caso de estudo, os equipamentos e a metodologia de trabalho dos 3 testes realizados;
- No capítulo 5, de carácter experimental, inclui-se um teste para se descobrir qual a emissividade que o drone a utilizar possui como predefinição e outro teste para efetuar a comparação da imagem térmica de uma câmara de infravermelhos terrestre com a do drone. É também realizado um estudo do procedimento para se obter um modelo 3D através da câmara infravermelha, que compreende uma análise de sensibilidade com o objetivo de perceber quais as situações e fatores ideais para se proceder a um levantamento com um drone. Por último, é realizado um levantamento final do edifício do caso de estudo com os parâmetros e condições ideais e feita uma comparação entre os tempos de reconstrução entre o modelo RGB e térmico;
- Por último, o capítulo 6 apresenta as conclusões retiradas a partir da realização e elaboração desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros de inspeção digital com termografia de infravermelhos com drones.

2

TÉCNICAS E METODOLOGIAS PARA A MODELAÇÃO 3D

2.1. BUILDING INFORMATION MODELING

2.1.1. DEFINIÇÃO E HISTÓRIA

Building Information Modeling (BIM) é a tecnologia revolucionária e o processo que rapidamente transformou a forma como os edifícios são concebidos, projetados, construídos e operados [1]. A sua criação está relacionada com a competição entre os Estados Unidos e a União Soviética para criar o melhor software de arquitetura de forma a mudar o conceito tradicional de desenho 2D em CAD [2]. A origem do BIM começa na década de 1970, quando Eastman cria o primeiro software com base numa biblioteca de elementos utilizado na construção de um modelo (*Building Description System*). Entre 1970 e 1980 surgem dois métodos diferentes de mostrar e gravar informação sobre a forma e geometria, CSG (*Constructive Solid Geometry*) e B-rep (*Boundary Representation*). Em 1988, Paul Teishcholz abre o CIFE (*Center for Integrated Facility Engineering*) em Standford, um núcleo para investigação sobre a quarta dimensão dos modelos (dimensão tempo). Nos anos 1990, Leon Raiz cria um software de modelação baseado em constrangimentos paramétricos, *Pro/Engineer*, tendo em conjunto com Irwin Jungreis e David Conant desenvolvido uma versão de gestão de projetos de arquitetura mais complexos, a que se dá o nome de *Revit*. A implementação do BIM na indústria da construção dá-se no ano 2000 [1-3].

Atualmente, o BIM é muitas vezes visto como apenas software (“buzzword”). Porém, o seu significado e intuito é bastante mais amplo e deve ser visto como um processo integrado. BIM é uma representação digital partilhada de características físicas e funcionais de um edifício. O modelo é formado por um conjunto de elementos individuais, parametrizáveis, com propriedades e significados associados e com interação entre si. Caracteriza geometrias, relações espaciais, informação geográfica, quantidades e propriedades dos elementos do edifício, estimativa de custos, inventários de materiais e planeamento de tarefas. Em adição, é também o recurso de conhecimento partilhado para informação de um edifício, formando assim uma base fidedigna para decisões durante o seu ciclo de vida (da conceção à demolição) e melhorando a qualidade do produto final, bem como a forma de permitir a colaboração, integração e a contribuição dos vários intervenientes e das várias especialidades durante todas as fases do ciclo de vida de um edifício. Facilita assim a inserção, extração, atualização ou modificação da informação no modelo com a vantagem de introduzir alterações e ajustes ao processo de uma forma automática (Figura 1) [1-3, 4-6].

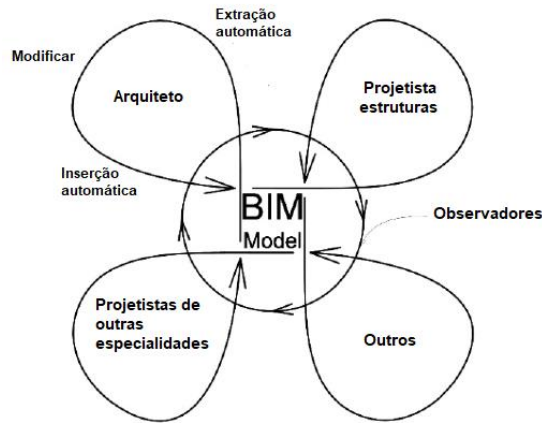


Figura 1 – Forma ótima de trabalhar num modelo BIM, adaptado de [5]

Da perspetiva tecnológica, BIM é uma simulação de um projeto que consiste em modelos 3D com ligação à informação pretendida e conectada à fase de planeamento, design, construção ou operação/manutenção (Figura 2). Comparando BIM com CAD 3D, pode dizer-se que este último descreve um edifício por vistas independentes, como planos, secções e elevações. Editar uma destas vistas implica atualizar e verificar as restantes vistas, o que pode gerar erros. Os desenhos 3D CAD são apenas elementos gráficos. BIM vem colmatar estes problemas e os objetos definidos como elementos ou sistemas do edifício (espaços, paredes, vigas, pilares) têm uma semântica contextual inteligente [1].



Figura 2 – BIM enquanto tecnologia, adaptado de [1]

BIM, como processo, junta todos os aspetos, disciplinas e sistemas de um edifício num único modelo virtual que permite a todos os membros da equipa e intervenientes colaborar mais eficientemente do que através dos processos tradicionais (Figura 3). Esta nova forma de comunicar e participar introduz uma grande mudança de processos de troca de informação entre todos os agentes. Trata-se por isso de um novo paradigma de trabalho, no qual a colaboração deve ser constante e continuada em todas as fases

de um empreendimento. O sucesso da implementação do BIM depende do envolvimento de todos os intervenientes logo desde a fase inicial do projeto, de modo a garantir que o modelo é o mais exato possível antes de arrancar para a fase de construção [1, 3].

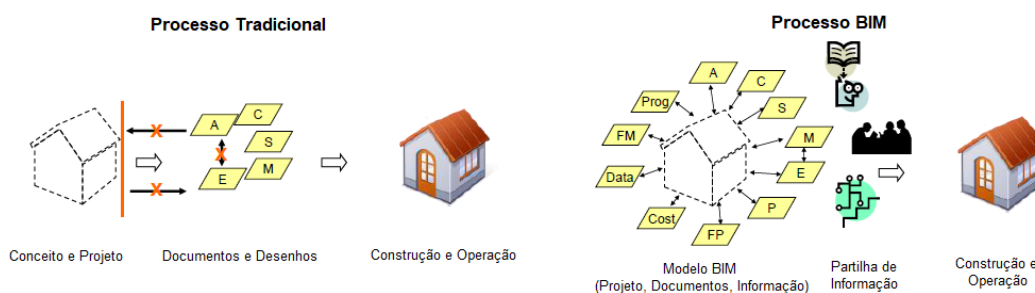


Figura 3 – Diferenças entre o processo BIM e o processo tradicional, adaptado de [1]

2.1.2. DE 3D A 8D BIM

As funcionalidades dos modelos BIM ajustam-se às diferentes fases de um projeto, sendo acrescentada informação ao modelo ao longo do desenvolvimento do mesmo. Distinguem-se diferentes níveis de informação nos modelos BIM à medida que o modelo ganha complexidade e informação (Figura 4). A organização de toda esta informação num modelo BIM facilita o acesso, consulta e gestão de informação relevante.

O desenvolvimento do modelo BIM é designado por BIM 3D. Nesta fase, destaca-se a melhoria evidente de comunicação entre os projetistas e o dono de obra. A possibilidade de considerar o fator tempo na informação que está no modelo permite criar e visualizar cronogramas de obra, simulando-os e adaptando-os às necessidades de cada projeto e agilizando o desenvolvimento do mesmo. Esta fase designa-se por BIM 4D. A dimensão designada por BIM 5D é relativa à orçamentação e possibilita obter diferentes simulações antes de iniciar a obra através do estudo das adaptações ou alterações de materiais que permitam conduzir a um maior rigor no controlo dos custos e consequentemente evitar derrapagens nos orçamentos de obra.

A informação relacionada com o nível 6D e 7D não é consensual ainda. BIM 6D pode ser definido como sustentabilidade ou gestão do edificado. Considerando o nível 6D como sustentabilidade, o nível 7D será a gestão do edificado ou vice-versa. Sustentabilidade é a fase que permite diferentes análises, como o consumo de energia, emissões associadas e a certificação de edifícios verdes. A gestão do edificado é a fase em que o modelo BIM é usado para gestão e manutenção dos edifícios, sendo muito útil a disponibilização da informação completa e atualizada ao dono de obra ou ao responsável pela gestão do edifício, pois trata-se da fase mais dispendiosa e longa do ciclo de vida um edifício [2]. Por último, BIM 8D diz respeito à segurança, em que é adicionada a previsão de possíveis riscos no processo operacional e construtivo, bem como acrescentados elementos de segurança e indicativos de riscos [7].

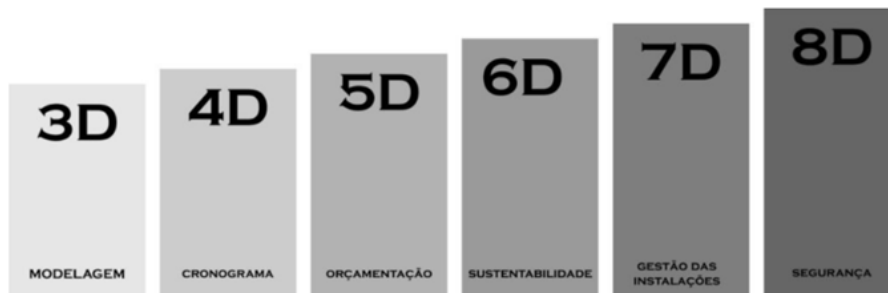


Figura 4 – Classificação do BIM 3D a 8D [7]

2.1.3. VANTAGENS DA IMPLEMENTAÇÃO DO BIM

Nas últimas décadas houve um aumento do interesse do setor da construção pelo uso do BIM devido aos benefícios que a sua implementação pode trazer e à necessidade de poupar recursos [3]. Como foi referido anteriormente, o BIM tem como âmbito a sua aplicação durante todo o ciclo de vida de um edifício. Será então de interesse perceber as vantagens que se obtêm com o seu uso em cada uma destas fases.

Azhar et al. [1] fizeram uma avaliação para cada uma das fases, recorrendo a casos de estudo e à análise de dados disponibilizados na literatura. A fase de planeamento permite às equipas realizar a análise do espaço e entender a complexidade das normas e regulamentos relacionados. Isto permite poupar tempo e cria a oportunidade para a realização de mais atividades que possam acrescentar valor e sejam de interesse. A junção do BIM com o QGIS ajuda no planeamento do projeto com a seleção do local apropriado de acordo com os requisitos, na diminuição de custos, na minimização do risco relacionado com o uso de materiais perigosos e a conduzir estudos de viabilidade e de marketing. Os avanços na tecnologia permitem a obtenção de modelos 3D com precisão e a sua integração no modelo BIM.

Na fase de projeto, arquitetos e engenheiros podem tirar vantagens das aplicações BIM. Através de um caso estudo em que foram preparados 3 modelos com designs diferentes e com 3 cenários de custo para cada, graças à possibilidade de “walk through” nos modelos, o dono de obra conseguiu selecionar a melhor opção de forma muito mais rápida, definitiva e mais bem informada do que com os métodos tradicionais de desenho.

Na fase anterior à construção, a preparação de estimativas de custos detalhadas através do BIM permitiram a redução do tempo de 3% a 80%. Ao utilizarem-se modelos BIM 3D e 4D, também é permitida a realização de planos de segurança mais realistas, pois permite identificar potenciais perigos, fazer planeamento logístico do local e desenvolvimento dos traçados de tráfego (gestão do local da obra).

Em adição, os modelos BIM permitem às equipas de projeto um planeamento detalhado da sequência de trabalhos (análise da construção). No caso de estudo analisado por Azhar et al. [1] realizou-se um modelo BIM para coordenação dos trabalhos, onde os potenciais perigos foram identificados com os vários intervenientes e procedeu-se ao desenvolvimento de planos de mitigação adequados. As animações 4D estiveram acessíveis aos trabalhadores e não foi registado nenhum acidente, sendo mesmo descritas como uma excelente ferramenta para ajudar os trabalhadores a identificar os potenciais perigos.

Na fase de construção é possível fazer a monitorização do progresso através de planos faseados usando BIM 4D, coordenação de reuniões e atualização constante do modelo BIM. Isto é facilitado pelo avanço na tecnologia, como smartphones e tablets que permitem usar os modelos BIM em obra e assim consultar

e coordenar a informação, realizar a função “walk through” e deteção de incompatibilidades (“clash detection”).

Após a construção é possível realizar a gestão dos trabalhos de manutenção, gestão de pedidos de serviço de emergência, gestão e planeamento do espaço e gestão de inventários e inspeções. Um modelo BIM torna as operações e a manutenção de um edifício mais eficiente, pois 85% do custo de um edifício ocorre após a construção e muitas vezes a informação é inadequada ou inexistente, o que gera custos muito superiores aos previstos. Avanços tecnológicos nos dispositivos móveis permitem a implementação da realidade aumentada e com isto a obtenção da informação ao apontar o dispositivo para o componente pretendido [1].

Segundo Azhar et al. [6], que se basearam também em casos de estudo e na análise de dados disponibilizados em literatura, obteve-se um valor de 3% acima na precisão de estimativas de custos, uma redução até 40% de mudanças não orçamentadas, poupanças até 10% do valor contratual através da deteção de incompatibilidades (“clash detection”) e redução do tempo de projeto até 7%. Para um dos casos de estudo apresentados, a Figura 5 mostra a importância da implementação do BIM para evitar erros de projeto antes do avanço para o processo construtivo que se traduz também na redução de custos [6].

Fase de colisão	Colisões	Estimativa da redução de custos	Horas de trabalho	Data
100% conflitos do projeto	55	\$124,500	n/a	30-Jun-06
Construção				
Cave	41	\$21,211	50 hrs	28-Mar-07
Level 1	51	\$34,714	79 hrs	3-Apr-07
Level 2	49	\$23,250	57 hrs	3-Apr-07
Level 3	72	\$40,187	86 hrs	12-Apr-07
Level 4	28	\$35,276	68 hrs	14-May-07
Level 5	42	\$43,351	88 hrs	29-May-07
Level 6	70	\$57,735	112 hrs	19-Jun-07
Level 7	83	\$78,898	162 hrs	12-Apr-07
Level 8	29	\$37,397	74 hrs	3-Jul-07
Level 9	30	\$37,397	74 hrs	3-Jul-07
Level 10	31	\$33,546	67 hrs	5-Jul-07
Level 11	30	\$45,144	75 hrs	5-Jul-07
Level 12	28	\$36,589	72 hrs	5-Jul-07
Level 13	34	\$38,557	77 hrs	13-Jul-07
Level 14	1	\$484	1 hrs	13-Jul-07
Level 15	1	\$484	1 hrs	13-Jul-07
Subtotal	590	\$564,220	1,143 hrs	
20% valor do material de MEI		\$112,844		
Subtotal da redução de custos		\$801,565		
75% de redução dos custos via métodos tradicionais		(\$601,173)		
Valor real da redução de custos		\$200,392		

Figura 5 – Poupança estimada através de uso do BIM na fase de projeto para uma construção na Geórgia, adaptado de [6]

Outro aspeto importante analisado no mesmo artigo, é a comparação dos custos da implementação da metodologia BIM com as poupanças obtidas diretamente através do seu uso. A Figura 6 apresenta 10 projetos diferentes e em todos eles o custo da implementação da metodologia BIM foi amplamente inferior às poupanças obtidas pelo seu uso, o que comprova a viabilidade do uso da metodologia BIM. Tenha-se em atenção que os valores obtidos em termos de percentagem num projeto serão diferentes relativamente a outro devido ao enorme conjunto de variáveis existentes que raramente são iguais [6].

Ano	Custo (\$M)	Projeto	Alcance BIM	Custo BIM(\$)	Poupanças BIM (\$)	Redução de custo (\$)	BIM ROI (%)
2005	30	Ashley Overlook	P/PC/CD	5,000	(135,000)	(130,000)	2600
2006	54	Progressive Data Center	F/CD/FM	120,000	(395,000)	(232,000)	140
2006	47	Raleigh Marriott	P/PC/VA	4,288	(500,000)	(495,712)	11560
2006	16	GSU Library	P/PC/CD	10,000	(74,120)	(64,120)	640
2006	88	Mansion on Peachtree	P/CD	1,440	(15,000)	(6,850)	940
2007	47	Aquarium Hilton	F/D/PC/CD	90,000	(800,000)	(710,000)	780
2007	58	1515 Wynkoop	P/D/VA	3,800	(200,000)	(196,200)	5160
2007	82	HP Data Center	F/D/CD	20,000	(67,500)	(47,500)	240
2007	14	Savannah State	F/D/PC/VA/CD	5,000	(2,000,000)	(1,995,000)	39900
2007	32	NAU Sciences Lab	P/CD	1,000	(330,000)	(329,000)	32900
Total				260,528	4,516,620	4,256,092	1633%
Total sem fase de planeamento e orçamentação				247,440	1,816,620	1,569,180	634%

Figura 6 – Análise do retorno no investimento do BIM, adaptado de [6]

Resumidamente, BIM não é apenas software. É também um processo, o que implica mudanças na maneira de trabalhar e no processo de entrega do projeto [1]. Os processos tradicionais de transmissão de documentos entre fases exigem uma enorme necessidade de capacidades e coordenação para transformação e obtenção dos dados pretendidos. BIM é a ferramenta que permite simplificar este processo de transmissão de informação tradicional e implementar a informação toda num só local acessível, o modelo virtual [5, 6].

Apesar de existir um único modelo BIM agregador de toda a informação, é possível definir diversos ambientes de trabalho onde podem coexistir os contributos dos diferentes projetistas. Deste modo, é possível moldar o modelo de acordo com as diferentes necessidades, garantindo ainda a integridade do trabalho de cada um e evitando que haja alterações sem a sua permissão [2].

A possibilidade de funcionar como extensão do modelo das várias especialidades da engenharia (Figura 7), o que inclui definições, visualização da produção, transporte e armazenamento, históricos, características físicas, técnicas e económicas, requisitos e custos, permite obter fontes importantes de análise [5]. Assim, há o potencial para gerar grande eficiência e harmonia entre todos os intervenientes que no passado se viam como adversários [1, 6].

As ferramentas BIM, ao permitirem a modelação paramétrica, possibilitam uma melhor visão espacial (visualização 3D), novos níveis de simulação, estimativa de custos, planeamento de tarefas e gestão dos materiais, identificação automática de incompatibilidades, ilustração de potenciais perigos ou falhas, bem como a demonstração e planeamento de planos de mitigação, gestão e operação da manutenção [4, 6]. Ou seja, BIM leva ao aumento da produtividade e eficiência na indústria da construção, evita trabalhos repetidos, elimina a maioria dos erros de projeto e as várias incompatibilidades entre as diferentes especialidades. Consequentemente, aumenta a qualidade dos projetos, ajuda no controlo de custos e na gestão dos processos, tornando-os mais eficientes e rápidos. Aprofunda a colaboração e comunicação entre os vários intervenientes, melhora a qualidade de produção, cria novas formas de colaboração com os clientes e aumenta a informação disponível, atualizada ao longo do ciclo de vida do edifício. Todos estes fatores permitem realizar uma construção mais segura e rigorosa em prazos e custos, além de contribuem para uma construção sustentável [2, 4, 6].

Os avanços tecnológicos dos dispositivos móveis vão permitir efetuar muitas ações de rápida decisão com os modelos BIM na própria obra. A capacidade de ter informação num só local, acessível através de um clique e os desenvolvimentos da realidade aumentada permitem aos responsáveis pela gestão do edifício operar mais eficientemente [1].

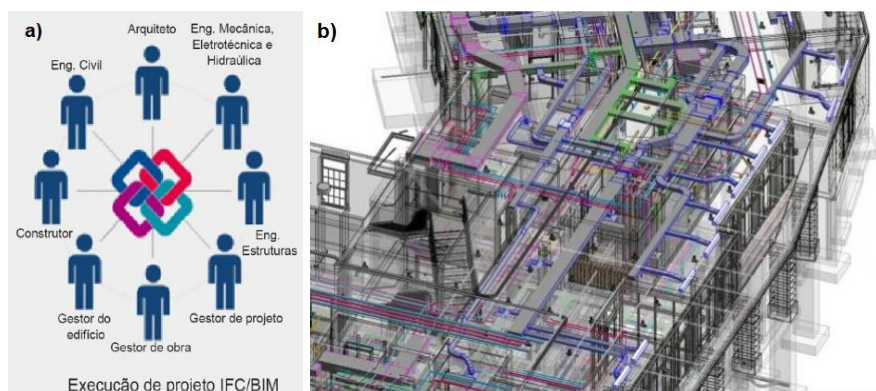


Figura 7 – Vantagens da implementação do BIM: a) os vários intervenientes comunicam entre si num só local; b) exemplo de modelo com as várias especialidades, adaptado de [2]

2.1.4. DESAFIOS À IMPLEMENTAÇÃO DO BIM

Apesar das evidentes e numerosas vantagens da implementação do BIM, o seu desenvolvimento e implementação implica um longo estudo, de forma que a se possa estabelecer uma visão de integração e confiança entre a equipa e de forma a que possa ser utilizado em simultâneo com ferramentas não BIM [4]. Uma nova realidade tecnológica faz com que exista alguma resistência dos meios humanos à transição do processo tradicional de trabalho para esta nova realidade. A adoção desta metodologia exige às empresas adaptação e a reformulação da organização, sendo necessários novos procedimentos [2].

Os principais problemas e obstáculos são: relutância dos intervenientes, falta de cooperação, fragmentação da indústria da arquitetura, engenharia e construção, falta de normas/regulamentos, acordos legais e processos contratuais, dificuldade em criar métricas, falta de pessoal especializado e com formação em BIM, problemas de licenças entre os vários intervenientes, interoperabilidade entre os diversos softwares, segurança relativamente à informação e a implementação do BIM ao longo de todo o ciclo de vida de um edifício [1, 3, 4, 6, 8].

De forma a ultrapassar os obstáculos e impulsionar a implementação do BIM na indústria da construção, é essencial garantir a interoperabilidade entre os diferentes softwares sem haver perda de informação. A interoperabilidade é a capacidade de trocar informação entre aplicações para facilitar a automatização e evitar informação duplicada. Apesar do IFC (*Industry Foundation Classes*) ser uma solução para esta questão, os utilizadores devem ter em atenção a questão da interoperabilidade na altura da escolha dos softwares BIM. Ao utilizar-se os mesmos softwares, é possível que a integração seja mais fluída e se otimize o tempo de entrada dos dados. Funcionalidades inteligentes ligadas ao modelo BIM através do manual de entrega de informação (IDM) e definições de vista do modelo (MDV) fornecem informação relevante, facilitando a troca de informação e evitando ambiguidades [1-3, 6, 9].

O utilizador tem o papel essencial para motivar a inovação por parte dos criadores de software, a correção de falhas existentes, o ajuste de softwares, processos, etc. Isto fará com que os criadores de software contribuam para a implementação do BIM. Este moldar e ajuste constante da tecnologia deve ser adotado desde o início da sua implementação e será o passo necessário para reformulação da organização e das práticas contratuais [1, 4].

Um dos desafios principais no desenvolvimento BIM é o seu uso durante o ciclo de vida de um edifício. Atualmente, encontra-se longe de estar totalmente implementado porque os responsáveis pela gestão dos edifícios e pela desconstrução não têm confiança nos modelos BIM e duvidam que as alterações ao projeto que possam eventualmente ocorrer sejam devidamente atualizadas no modelo pelos

intervenientes, perdendo assim o seu propósito [4]. É também necessário garantir condições e assegurar o aumento e a formação adequada dos trabalhadores [1-3].

É necessário conjugar o interesse dos utilizadores e dos criadores de software com diretrizes impostas pelos governos e autoridades públicas competentes para resolver os desafios impostos, já que a implementação é reforçada ao mesmo tempo pelas leis em vigor que permitem trazer a maior transparência. O equilíbrio entre criadores, utilizadores e entidades competentes levará ao desenvolvimento de regulamentos que neste momento são inexistentes e constituem uma forte tendência para a conjunção de práticas [1, 4, 5].

A criação de regulamentos, normas, guias para os contratos, processos e estratégias de transação da informação irá ajudar a combater os obstáculos à implementação do BIM. O seu uso isolado e a existência de regulamentos individuais que podem criar inconsistências no modelo, definir o responsável por controlar a entrada de informação no modelo e pela averiguação de incongruências possíveis permitirá evitar a falta de consenso em como usar e implementar BIM, prevenir o desacordo devido aos direitos de autor e responsabilidades [1, 3, 6].

Antes de se avançar com o uso do BIM, devem ser identificados todos os riscos associados, negociados os vários pontos relacionados com indemnizações, garantias e prémios de forma a proteger quem partilha as informações e distribuir os riscos e prémios pela equipa [1, 6]. O conceito de IPD (*Integrated Project Delivery*) permite que muito destes riscos e compensações sejam partilhados por todos os participantes [1, 4, 6].

Por último, a utilização do BIM permite a aplicação do conceito *Lean*, que é um dos grandes desafios para a indústria da construção. Melhorar os processos, o ritmo da informação, das ações e dos materiais pode levar a uma maior implementação do BIM [1, 4].

Em alguns países, foram desenvolvidas normas que apoiam e orientam a adoção desta metodologia, guiando as empresas em termos de processos internos e externos. Atualmente há países que obrigam a utilização do BIM, como a Finlândia e Singapura. Nestes países são elaboradas normas, projetos-pilotos para promover a implementação. Outros países, como o Reino Unido, definiram uma data a partir da qual passou a ser obrigatório o seu uso. Além dos países atrás referidos, outros começaram a adotar estratégias idênticas, nomeadamente a Dinamarca, Holanda e Brasil. Ou seja, um pouco por todo o mundo, podem-se observar iniciativas de legislação do BIM com o objetivo de promover o uso e a implementação do mesmo.

Portugal caminha ainda para a criação do processo de normalização, porém há iniciativas a nível académico: foi criado um grupo de trabalho específico sobre esta temática (GT BIM), o BIMForum Portugal, que lidera a promoção do BIM no país ao nível do desenvolvimento de melhores práticas e padrões para a gestão da construção; cursos BIM, workshops e sessões são lançados com alguma frequência pela Ordem dos Engenheiros e outras instituições. Apesar de Portugal estar ainda aquém de alguns países nesta matéria, está a dar largos passos para a curto ou médio prazo poder também ter uma Norma BIM e poder competir no mercado internacional da indústria da AEC (*Architecture, Engineering and Construction*), onde esta exigência é já uma realidade [2].

2.2. RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL

2.2.1. BIM E EDIFÍCIOS EXISTENTES

Inicialmente o desenvolvimento de BIM focou-se nas fases de planeamento e conceção do projeto (início do ciclo de vida de um edifício), deteção de incompatibilidades (“clash detection”), visualização,

quantificação, estimativa de custos e gestão de dados. Por estas razões, em novos edifícios, a utilização do BIM está a aumentar [10]. Com a evolução da tecnologia e dos processos, a investigação começa atualmente a recair na análise energética e certificação, na recolha automática de informação e parâmetros, na comparação de soluções e otimização, análise estrutural e nas fases mais tardias do ciclo de vida de um edifício - manutenção, reabilitação e desconstrução [9, 10].

Atualmente, são várias as plataformas e ferramentas BIM disponíveis do mercado, como por exemplo *ArcGIS*, *Revit*, *Energy Plus* e *SketchUp* [9, 11]. A Figura 8 mostra as diversas ferramentas BIM existentes conforme a fase do ciclo de vida do edifício e de acordo com especialidade quando na fase de projeto. Das mencionadas, destaca-se o *Revit* que é líder no mercado e inclui funcionalidades para o desenvolvimento e planificação de projeto de arquitetura, instalações e estruturas [11].

Fase do ciclo de vida da edificação (aplicação)		Ferramenta			
Estudo de viabilidade		<i>Trelligence Affinity</i> <i>Facility Composer</i>			
Projetação	Arquitetura	<i>Revit Architecture</i> <i>ArchiCAD</i> <i>Vectorworks</i> <i>Bentley Architecture</i> <i>Allplan</i>			
		Conforto ambiental	<i>Autodesk Ecotect Analysis</i> <i>Green Building Studio</i> <i>Graphisoft EcoDesigner</i> <i>Autodesk Project Vasari</i> <i>Energyplus</i> <i>DesignBuilder</i>		
			Estrutura	<i>Tekla Structure</i> <i>Revit Structure</i> <i>CAD/TQS</i> <i>Bentley Structure</i>	
				Elétrica, Hidráulica/HVAC	<i>Revit MEP</i> <i>Bentley – Building Electrical Systems</i> <i>MEP Modeler (ArchiCAD)</i> <i>Bentley Mechanical Systems</i> <i>DDS-HVAC</i>
					Gerenciamento de projetos
	Planejamento da construção / construção	<i>Navisworks</i> <i>Synchro</i> <i>Solibri</i> <i>Vico Software</i> <i>Volare/TCPO</i> <i>Primavera</i> <i>MSPProject</i> <i>Tron-arc</i> <i>Orca Plus</i>			
		Uso: operação / manutenção	<i>ARCHIBUS</i> <i>CAFM Explorer</i> <i>Bentley Facilities</i>		
			Requalificação / demolição	As mesmas ferramentas da fase de projeção	

Figura 8 – Exemplos de ferramentas BIM [11]

Como já foi referido, a utilização do BIM estende-se a todo o ciclo de um edifício. Porém, muitos edifícios existentes são anteriores à implementação do BIM ou possuem documentação insuficiente. As alterações nos edifícios ao longo do seu ciclo de vida podem ser várias (construção diferente do projeto, reabilitações), fazendo com que os modelos existentes não correspondam à realidade [3, 11, 12]. Apesar de ser possível construir modelos BIM a partir de modelos CAD de um edifício (“as-designed”), o modelo não oferece a visão real do estado atual do edifício (“as-in”) nem representa a forma como foi realmente construído (“as-built”). Assim, percebe-se a importância da existência de metodologias para criar modelos BIM que consigam representar o estado atual dos edifícios mesmo que sem nenhuma base de informação [12].

O estudo do estado atual dos edifícios através de métodos não destrutivos, seja para reabilitação, simulação ou documentação de edificações históricas, está a ganhar relevo devido ao desenvolvimento de tecnologias para captação e reconstrução tridimensional e da necessidade de levar o uso do BIM às etapas de manutenção e gestão do edificado [11]. Para o caso de edifícios com modelo BIM pré-existente deve-se proceder à sua atualização e no caso de não haver um modelo BIM deve-se proceder ao levantamento geométrico dos elementos do edifício para recolher e modelar as condições atuais do edifício, obtendo assim uma representação de alta qualidade com riqueza semântica [3, 12].

O uso de tecnologia de captação e reconstrução tridimensional permite obter nuvens de pontos com a forma real dos edifícios, as irregularidades e imperfeições decorrentes do processo construtivo e as deformações e desgastes naturais que os edifícios apresentam [11]. Os principais parâmetros que condicionam a escolha da técnica de levantamento são o custo, o tempo, nível de desenvolvimento, condições climáticas e características do ambiente durante a captação. Para se realizar um estudo completo em edifícios existentes, deve-se combinar os dados captados pelas técnicas de levantamento com outros métodos não destrutivos para se analisar materiais e propriedades [3].

Contudo, existem também obstáculos e desafios para que a implementação do BIM em edifícios existentes seja conseguida. Em comparação com os contratos do processo de construção, a maioria dos contratos dos processos de manutenção e desconstrução ainda não adotam a implementação do BIM, pelo que estes ainda não foram desenvolvidos nem regulamentados. Por esta razão, necessitam de ser adaptados.

Na aplicação a certos requisitos funcionais de manutenção ou desconstrução, principalmente de edifícios muito grandes, o tempo de processamento de informação pode ser muito elevado devido ao elevado nível de desenvolvimento e ao grande volume de informação ou à limitação da capacidade computacional dos dispositivos móveis. Futuros desenvolvimentos na área do desempenho computacional podem ser um passo importante para desbloquear certas limitações.

Com o objetivo de se ter funcionalidades de manutenção, é necessária informação detalhada, como materiais ou componentes. Porém, esta informação não é automaticamente reconhecida, pelo que requer grande interação do utilizador. É necessário pessoal qualificado, grande empenho para modelar um edifício já existente, desenvolvimentos na captação, processamento e modelação automática de forma a reduzir os custos associados e o aumento da produtividade baseado em processos BIM de manutenção e desconstrução. O uso do BIM e o conceito de IPD requiere profundas mudanças dos processos da nova construção, mas também para os processos de manutenção e desconstrução [3].

2.2.2. TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO

Atualmente existem vários métodos para realizar levantamentos de informações métricas. As técnicas podem-se classificar em diretas ou indiretas. Os métodos diretos são os que envolvem o contacto físico do operador ou do equipamento utilizado com o objeto ou áreas a levantar. As técnicas indiretas são, portanto, medições realizadas de uma posição afastada do objeto ou área a levantar.

A categoria indireta divide-se ainda em métodos ativos e passivos. Métodos ativos são considerados aqueles que possuem sensores que emitem energia para realizar a medição. Nos métodos passivos, não há emissão de energia [11].

Exemplo de técnicas diretas são a CMM (*Coordinate Measuring Machine*) e a GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Exemplos de métodos indiretos ativos são o laser scanning, georadar, métodos topográficos (Figura 9) e exemplos de métodos indiretos passivos são a fotogrametria, videogrametria, SfM e termografia (Figura 9) [3, 11].

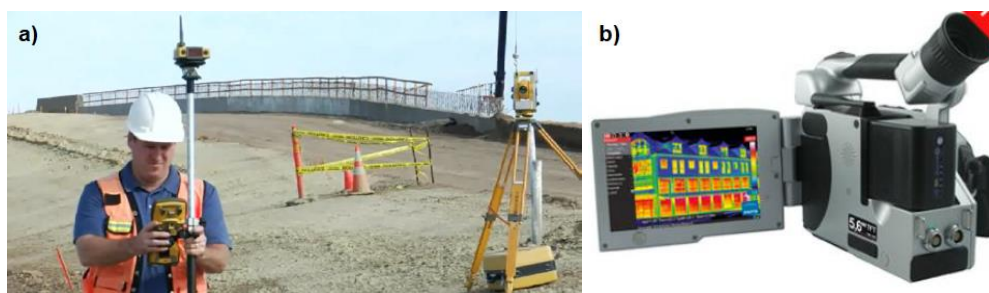


Figura 9 – Técnicas de levantamento: a) estação total robotizada; b) câmara termográfica, adaptado de [11]

Deve-se ter em conta que a escolha da técnica de levantamento deve considerar os objetivos do levantamento, os requisitos exigidos, o detalhe e a precisão dos resultados, as características do objeto a levantar (dimensões, acabamento das superfícies externas, acessibilidade e obstáculos existentes), conhecimento técnico da equipa, recursos financeiros e tecnológicos e tempo disponível para efetuar a ação. A Figura 10 ajuda a entender a necessidade de se fazer uma análise prévia para se conseguir tirar o maior proveito da técnica a escolher. Cada técnica tem um intervalo de complexidade e de tamanho do objeto a que se adapta melhor, correspondendo apenas a dois dos fatores acima mencionados [11].

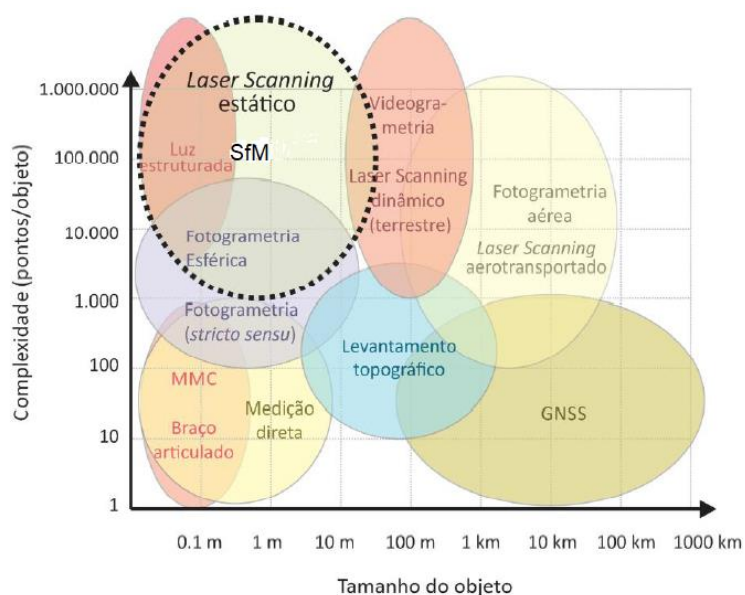


Figura 10 – Comparação de várias técnicas de levantamento em relação à escala e complexidade do objeto, adaptado de [11]

2.2.3. FOTOGAMETRIA

A história da fotogrametria remonta para os anos de 1840, quando o primeiro sistema foi desenvolvido por Aimé Laussedat. Outro pioneiro no campo da fotogrametria foi Meydenbauer, que usou esta técnica para registar vários monumentos históricos, igrejas e edifícios com base no método de Laussedat. Em 1885, Meydenbauer criou um instituto em Berlim com o intuito de fazer registo de edifícios arquitetónicos. Todos estes desenvolvimentos contribuíram para que em 1910 se formasse o ISP (*International Society for Photogrammetry*) [13].

Nestas primeiras décadas do uso da fotogrametria, esta era realizada de uma forma ótica-mecânica. Os instrumentos eram grandes, complexos e caros pelo que teriam que ser usados apenas por profissionais com uma vasta experiência (operador fotogramétrico). Esta fase denominava-se por fotogrametria analógica [14]. A fotogrametria só começa a ter relevo a partir de 1960, quando as câmaras começam a ter preços mais acessíveis [13]. Com o aparecimento dos computadores, o processo analógico passa a ser executado através de algoritmos. Os equipamentos passam a ser significativamente mais pequenos, baratos e fáceis de trabalhar com o apoio de dispositivos capazes de registar as coordenadas do hardware e de posicionar as fotografias geridos diretamente pelo computador. Contudo, o trabalho continua a ser realizado através de fotografias analógicas e de parte de equipamento ótico e mecânico de alta precisão. Esta fase foi denominada por fotogrametria analítica [14].

O crescimento da fotogrametria aumenta na década de 1970 devido ao rápido desenvolvimento dos computadores e torna-se ainda mais rápido na década de 1990 com o aparecimento das câmaras digitais (Figura 11), inclusive com a capacidade de converter as antigas fotografias analógicas em digitais através de um scanner. Esta última fase é chamada de fotogrametria digital [13, 14].



Figura 11 – Câmara Digital

A fotogrametria é uma técnica que fornece informação quantitativa e é usada para extrair a geometria, dimensão, localização e deformação de um objeto com recurso a fotografias ou imagens digitais através da sua medição e análise [10, 11, 13, 14]. A fotogrametria tem também várias classificações conforme o posicionamento do sensor ótico, o número de fotografias utilizadas e o tipo de reconstituição e o nível de automação do processo de reconstituição. Conforme o posicionamento do sensor ótico, a fotogrametria pode ser classificada de terrestre, aérea ou orbital [11].

A fotogrametria terrestre é geralmente usada para obter informação dimensional detalhada [13]. A fotogrametria aérea pode ser realizada por balões, helicópteros, VANT (Veículos Aéreos Não Tripulados) e é geralmente aplicada na monitorização e controlo ambiental, na prevenção de desastres e para gerar mapas topográficos [11, 13]. Na fotogrametria orbital os sensores estão posicionados em satélites para levantamento de grandes áreas terrestres.

O número de fotografias usadas e o tipo de reconstituição podem ser classificados em monorreconstituição (apenas 1 fotografia), estereorreconstituição (utilização de fotografias paralelas aos pares e com grande área de sobreposição) ou reconstituição de múltiplas fotografias convergentes (as fotografias devem ser convergentes e deve-se fotografar o objeto de diversas posições). A estereorreconstituição e reconstituição de múltiplas fotografias convergentes são os métodos mais precisos e que permitem obter modelos mais completos (Figura 12).

Quanto ao nível de automação do processo de reconstituição, este pode ser interativo (programas que usam processos interativos), semiautomático (programas que possuem comandos como a correlação de ponto homólogos) ou automático (programas que automaticamente fazem a correlação entre as fotografias e geram nuvens de pontos) [11].

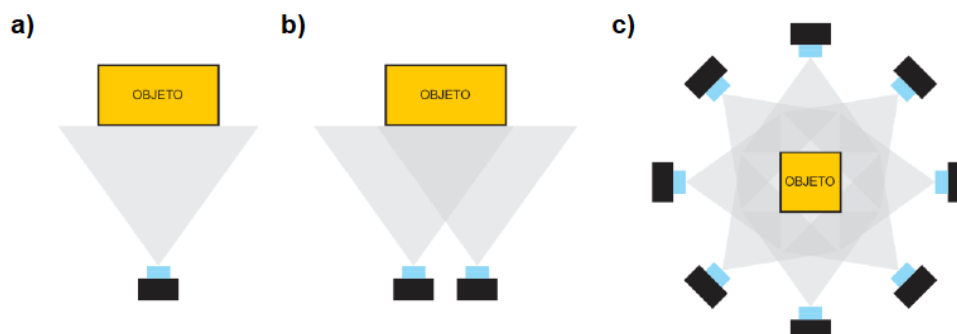


Figura 12 – Tipos de reconstituição: a) monorreconstituição; b) estereorreconstituição; c) reconstituição de múltiplas fotografias convergentes, adaptado de [11]

Na fotogrametria, o uso de câmaras digitais deve ter em conta os seguintes fatores: resolução, distância focal, foco, exposição, formato da imagem, memória de armazenamento e características da bateria. Por vezes pode ser importante ter acessórios como um tripé, flash externo e controlo remoto.

A distância da câmara ao objeto tem influência nos resultados obtidos. Quanto maior for a distância entre a câmara e o objeto e menor for o ângulo da lente, menor a profundidade (Figura 13). Portanto, se o objetivo é obter uma planta, a fotografia deve ser tirada à maior cota possível (similar a uma imagem satélite). Caso se pretenda fazer medições e ver a imagem estereoscopicamente, as fotografias devem ser tiradas num ângulo amplo de forma a ser possível obter a profundidade do objeto. A partir de uma fotografia, apenas se consegue obter coordenadas de duas dimensões. A partir de 2 ou mais fotografias do mesmo objeto, mas tiradas de posições diferentes, é possível calcular as coordenadas tridimensionais de qualquer ponto representado em comum nas fotografias [14].

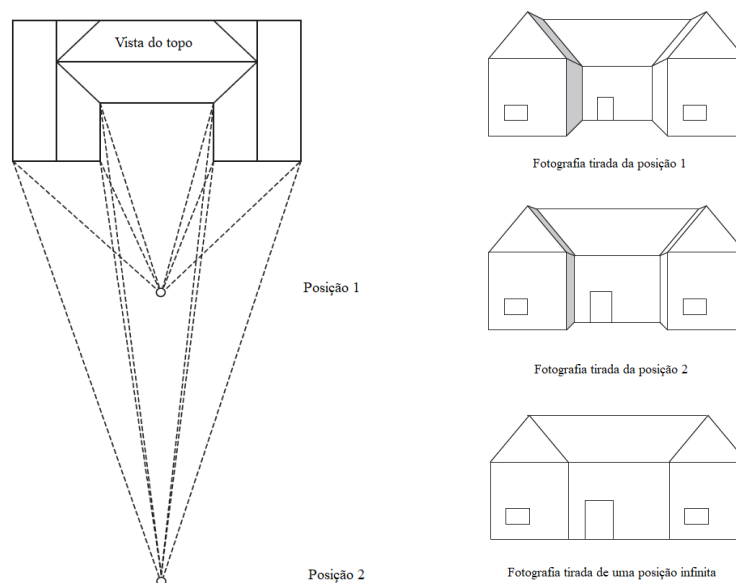


Figura 13 – Representação das perspectivas de acordo com a posição e ângulo da lente da câmara fotográfica, adaptado de [14]

Com os avanços tecnológicos das câmaras digitais e das câmaras de alta resolução, disponíveis a preços mais baixos, e com a produção de novas câmaras de alta velocidade, a fotogrametria é atualmente aplicada em várias áreas [10]. Exemplos dessas áreas de aplicação são a arqueologia, agricultura, medicina, química, biologia, indústria aeroespacial, engenharia automóvel, engenharia mecânica, biomecânica, arquitetura e engenharia civil [10, 11, 13].

A sua vasta aplicação em tão diversas áreas deve-se ao facto de esta ser uma técnica não destrutiva com a capacidade de fazer medições em locais de difícil acesso, menos trabalhosas e que envolvem menos pessoal para as executar, com a capacidade de obter grandes quantidades de informação geométrica num curto espaço de tempo. Também permite voltar a aceder aos dados (imagens) posteriormente e pode ser usada como uma ferramenta de rotina para medição [13, 15].

A extração e obtenção de pontos tridimensionais, medidas, modelos geométricos, em grande quantidade e com precisão de fotografias são extremamente úteis para a criação e visualização de modelos 3D [11, 15]. Devido à digitalização global, a fotogrametria é agora também uma alternativa eficaz para efetuar medições e reconstruções de edifícios. A precisão obtida nos modelos 3D corresponde perfeitamente aos requisitos exigidos e devido à disponibilidade no mercado de câmaras digitais a preços acessíveis, a fotogrametria é uma alternativa superior a qualquer outra baseada em CAD [15].

A fotogrametria também pode ser utilizada para a datação e estudo de edifícios históricos e que fazem parte da herança cultural de uma região. Para garantir a sua preservação, é necessário o uso de técnicas não destrutivas para se poder avaliar as características geométricas, os materiais que constituem os elementos construtivos e as suas patologias. No estudo realizado por Sánchez e Quirós [16] comprovou-se que o uso de equipamento fotogramétrico de baixo custo permitiu estudar as fachadas de edifícios históricos, obtendo-se medições com alta precisão da sua superfície [16].

2.2.4. STRUCTURE FROM MOTION

Através de algoritmos é possível reconstruir tridimensionalmente um objeto a partir de fotografias tiradas em diferentes pontos e com grandes áreas de sobreposição [11]. A reconstrução tridimensional é o processo que permite gerar reconstruções 3D de objetos através dos resultados obtidos pela captação de informação [17].

Os modelos 3D de estruturas são bastante importantes para que se possa proceder ao seu estudo, análise, reconstrução e documentação [15]. Estes modelos são geralmente apresentados na forma de nuvens de pontos, geométrica e em malha (“mesh”), nas quais as nuvens de pontos são a base [17]. Sendo uma técnica eficaz e com uma boa relação de custo-benefício, tem vindo a ser aplicada em várias áreas, como por exemplo na engenharia médica, arquitetura, engenharia civil e turismo [15, 17]. Nos últimos anos, a engenharia civil tem usado esta metodologia para preservação de edifícios históricos, análises energéticas, para obter a textura da superfície de pavimentos, entre outras. Apesar do seu uso ser recente na área, possui grande potencial para o futuro. As técnicas de reconstrução 3D em engenharia civil dividem-se em dois grandes passos: gerar as nuvens de pontos e processar as mesmas, como é representado na Figura 14 [17].

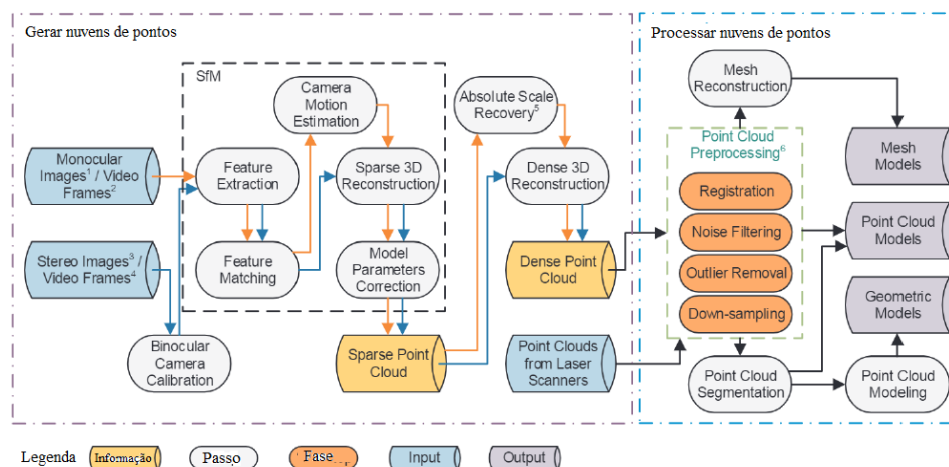


Figura 14 – Linha de trabalho para se obter uma reconstrução tridimensional, adaptado de [17]

O processo de gerar as nuvens de pontos é feito através da extração e combinação de características, estimativa de movimento da câmara, reconstrução 3D dispersa, correção dos parâmetros do modelo, recuperação da escala e reconstrução 3D densa [17]. Os primeiros 5 passos fazem parte da metodologia SfM e a criação de nuvem de pontos por processamento digital de fotografias é alcançada graças à conjugação dos princípios da fotogrametria com a evolução tecnológica dos computadores e o surgimento das máquinas digitais [11, 17].

SfM é um método da fotogrametria de baixo custo, de curta distância, para obter modelos 3D de alta resolução. Este método opera com base nos mesmos princípios que a fotogrametria estereoscópica, mas as coordenadas 3D são obtidas automaticamente pela sucessiva sobreposição de imagens consecutivas. A sua aplicação é ideal em ambientes com menos vegetação e ambientes áridos e semiáridos porque facilita a extração de pontos chave.

Enquanto que na fotogrametria estereoscópica é requerida a localização e a posição de cada câmara ou dos pontos de controlo, o método SfM não requer nenhuma especificação exigida na fotogrametria tradicional para se obter uma reconstrução. Todo o cenário é reconstruído através da identificação automática e simultânea de pontos com características iguais nas várias imagens [18]. Os pontos homólogos de imagem para imagem vão sendo constantemente ajustados interativamente [11, 18]. Contudo, as posições da câmara durante o processo automatizado não possuem escala nem orientação. Os pontos das nuvens são gerados num espaço-imagem relativo que necessita de ser ajustado de acordo com o sistema de coordenadas real do espaço-objeto [18].

Para o processamento das nuvens de pontos e estas coincidirem com os requisitos pretendidos são necessários 4 passos: o pré-processamento da nuvem de pontos, reconstrução da malha, segmentação da nuvem de pontos e modelação da nuvem de pontos. Cada um destes passos recorre a métodos e a algoritmos específicos de acordo com a Figura 15 e Figura 16 [17].

Inputs	Passos	Algoritmos e métodos
Imagens monoculares/frames de vídeo	Feature extraction	SIFT [28,39-43] (including SIFT detector and SIFT descriptor); SURF [21] (including SURF detector and SURF descriptor); ASIFT [44]; FREAK [45]; Harris corner detector [38]; FAST [38]; MSD [38]
	Feature matching	RANdom SAmple Consensus (RANSAC) [40,43,46-48]; Optimized Random Sampling Algorithm (ORSA) [44]; Approximate Nearest Neighbors (ANN) [29,45]; Fast Library for Approximate Nearest Neighbors (FLANN) [43]
	Camera motion estimation	Direct Linear Transform (DLT) [40,49]; Five-point algorithm [45,49]; Eight-point algorithm [21,44,50]
	Sparse 3D reconstruction	Triangulation [28,29,38,43]
	Model parameters correction	Bundle Adjustment (BA) [28,41,43-45];
	Absolute scale recovery	Geo-registration [51,52]; Recovering manually [53]; Recovering by premeasured objects [53]
	Dense 3D reconstruction	Clustering Multi-View Stereo (CMVS) [28,29,54]; Patch-based Multi-View Stereo (PMVS) [29,44,53,55,56]; Semi-Global Matching (SGM) [43,57]
Imagens stereo/frames de vídeo	Binocular camera calibration	Two-step procedure [20,58]

Figura 15 – Algoritmos e métodos usados para gerar nuvens de pontos, adaptado de [17]

Passos	Fases	Algoritmos e métodos
Point cloud preprocessing	Registration	Iterative Closest Point (ICP) [43,52,78]
	Noise filtering	Removing points manually [79];
	Outlier removal	RANSAC [28]
	Down-sampling	Point spacing strategy [80];
Mesh reconstruction	-	Poisson surface reconstruction (PSR) [29,54,81]
Point cloud segmentation	-	Region growth [82,83]; K-means clustering [78]; Voxel-based algorithm [84]; Hough transform [85]; RANSAC [86]
Point cloud modeling	-	Obtaining the dimensions of objects [79,87,88]

Figura 16 – Algoritmos e métodos usados para processar nuvens de pontos, adaptado de [17]

O processo de gerar a nuvem de pontos passa então por inserir as fotografias retiradas em campo no software. O software irá correlacionar as imagens, reconstruir a geometria do objeto de onde se obtém uma nuvem de pontos dispersa, associar os pontos homólogos em conjunto com mapas de profundidade e irá criar o modelo geométrico na forma de nuvem de pontos densa ou de malha. Depois de o software cumprir estas etapas, pode-se ainda fazer o preenchimento de vazios, filtragem ou decimação da malha, corrigir a escala do modelo e a sua rotação. O modelo final pode ser exportado para outros programas. Na presente dissertação, o principal interesse será a obtenção de modelos BIM ou HBIM (*Historic Building Information Modelling*).

A qualidade da reconstrução obtida através da correlação automática está dependente de alguns fatores. O objeto fotografado não deve possuir uma grande quantidade de textura uniforme, refletiva ou espelhada. Caso possua, o resultado final pode ter muito ruído (pontos apresentados de forma errada na nuvem de pontos), áreas de sombra (incompleto) e pouca precisão. Porém, a viabilidade da técnica está dependente da forma como se opera ao tirar as fotografias.

Deve-se ter atenção à resolução da imagem, nitidez, quantidade de fotografias, aos ângulos em que foram retiradas e à iluminação. Destaque-se este último fator, pois as fotografias devem ser retiradas nas mesmas condições de luz para diminuir a variação radiométrica entre fotografias distintas, permitindo assim o processo de correspondência de pontos. Seguem-se exemplos de como proceder para

retirar as fotografias, em que o primeiro caso é equivalente a um edifício, o segundo a uma fachada e o terceiro ao interior de um edifício (Figura 17) [11].

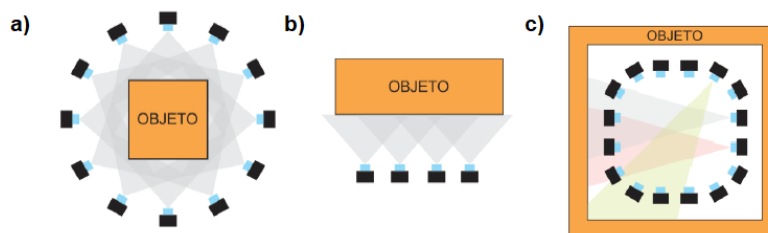


Figura 17 – Procedimento para capturar informação: a) de um edifício; b) de uma fachada; c) do interior de um edifício, adaptado de [11]

No uso desta metodologia é importante perceber a variação do tempo de processamento para gerar uma nuvem de pontos. Como é referido no artigo realizado por Westoby et al. [18], com um sistema de 64-bit, 2,8 GHz CPU, 512 MB GPU e 6 GB RAM o processamento de 400 a 600 imagens com resolução de 2272 por 1740, está entre 7 e 56 horas. O tempo de processamento depende da complexidade da textura da imagem. A redução do tamanho das imagens tem como consequência o decréscimo da densidade da nuvem de pontos pela redução de pontos chave necessários para a reconstrução. Contudo, a evolução tecnológica ao longo dos últimos anos e o aparecimento de programas gratuitos com uma grande capacidade de manipulação de um elevado número de pontos, como por exemplo o *MeshLab*, vão permitir a diminuição do tempo de processamento e que se usem cada vez mais fotografias de alta resolução [18].

Quanto à precisão, tem-se desvios na casa dos milímetros e noutros casos de alguns centímetros, correspondendo a maiores desvios quando comparados aos obtidos em levantamentos com recurso a laser scanner. Porém, estes desvios são a maior parte das vezes aceitáveis. A precisão depende da qualidade dos dados de entrada e dos algoritmos e métodos usados para gerar e processar as nuvens de pontos [17].

A reconstrução 3D a partir da fotogrametria tem ainda uma boa margem de crescimento no futuro. O aumento da precisão levará ao uso desta técnica noutras áreas que exijam uma grande precisão do modelo final. A criação de algoritmos e sistemas que permitam executar a fase de processamento das nuvens de pontos de forma automática e a redução do tempo de operação nas duas fases de reconstrução, irá tornar esta técnica ainda mais apelativa. A capacidade de reconstruir elementos além da casca do objeto, ou seja, elementos interiores que formam a estrutura do objeto, permitirá efetuar outro tipo de análises e potenciará a sua aplicação nas várias áreas da engenharia civil [11].

2.3. TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

2.3.1. DEFINIÇÃO E HISTÓRIA

A termografia de infravermelhos permite a aquisição e análise de informação baseada na deteção da radiação térmica emitida por uma superfície, que possibilita a medição e a observação de padrões de distribuição de temperaturas [19-21], invisíveis ao olho humano (Figura 18).

É uma técnica 2D, sem contacto e não destrutiva, que permite determinar a integridade de um material ou estrutura e avaliar quantitativamente as suas características sem danificar nem causar “stress” no mesmo [19, 22, 23]. A termografia de infravermelhos é uma técnica útil para engenheiros e arquitetos,

pois permite a avaliação dos edifícios existentes e a identificação de potenciais patologias. Neste sentido, ao longo dos últimos 40 anos a termografia tem vindo a ser usada para testar e diagnosticar edifícios, estruturas e edifícios históricos [19, 23].

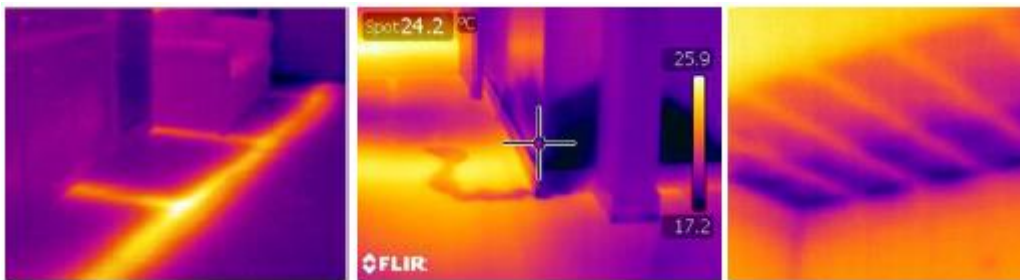


Figura 18 – Exemplos de imagens termográficas em edifícios [11]

Em 1800, William Herschel descobriu a radiação infravermelha [19-24]. Herschel concluiu que as radiações que se situavam para além da luz vermelha, invisíveis ao olho humano, eram responsáveis pelo aquecimento dos objetos [24]. Nos anos que sucederam, nomes como Planck, Boltzmann, Stefan, Maxwell, Kirchoff e Melloni, são responsáveis pela compreensão da distribuição da energia no espectro da radiação térmica [22].

Cerca de 30 anos depois da descoberta da radiação infravermelha, é desenvolvido o primeiro detetor de infravermelhos [19, 24]. Em 1917, fruto dos avanços tecnológicos, surge o primeiro detetor quântico desenvolvido por Case, que melhora o tempo de resposta e a precisão de medição [20, 24]. Entre 1930 e 1960, surgem vários detetores infravermelhos, principalmente para fins militares [24]. Na década de 1960 surgem os primeiros dispositivos de infravermelhos no mercado capazes formar imagens instantâneas, as câmaras de infravermelhos [19, 20, 24]. Desde 1990, que as novas gerações de equipamentos com detetores matriciais permitem a leitura simultânea da temperatura em diferentes pontos, pelo que fazem com que a sua aplicação se estenda a várias áreas, incluindo a inspeção de edifícios [19, 24]. Para a análise de edifícios, recomenda-se o uso câmaras termográficas com gama espectral entre os 7,5 μm e os 13 μm [25].

O uso da termografia de infravermelhos tem vindo a ser aplicado em várias áreas diferentes. Áreas estas como a militar, medicina, medicina veterinária, industrial, agricultura, arqueologia, manutenção de sistemas mecânicos e eletrónicos, engenharia civil e conservação do património histórico [11, 20, 26]. Quando aplicada ao estudo dos edifícios, termografia de infravermelhos provou ser eficaz na deteção de humidade (humidade na construção, infiltrações de água da chuva, humidade ascensional e condensações), na identificação do descolamento de ladrilhos cerâmicos ou delaminação de outros materiais de revestimento, na deteção de pontes térmicas, de falhas no isolamento térmico, na identificação de fugas/infiltrações de ar, na localização de fissuras estruturais, vazios no betão e corrosão de armaduras. Também tem vindo a ser usada para avaliar o desempenho energético dos edifícios, através da monitorização do impacto dos equipamentos de ar condicionado nas temperaturas superficiais e da determinação do coeficiente global de transferência de calor (U) (Figura 19) [11, 19, 21, 23, 25-27].



Figura 19 – Aplicação da termografia na: a) monitorização do impacto dos equipamentos de ar condicionado nas temperaturas superficiais; b) e c) avaliação do desempenho energético antes e após reabilitação, adaptado de [11, 26]

2.3.2. PRINCÍPIOS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

A termografia baseia-se na emissão de radiação (transferência de calor), uma vez que todo o corpo com temperatura acima do zero absoluto (0 K ou -273,15°C) emite radiação infravermelha, devido à agitação térmica dos seus átomos e moléculas. Os sensores termográficos trabalham na faixa da região infravermelha do espectro eletromagnético (Figura 20) [20, 21, 24]. Viaja através do espaço à velocidade da luz e o seu comprimento de onda situa-se entre os 0,75 μm e os 1000 μm [19, 24].

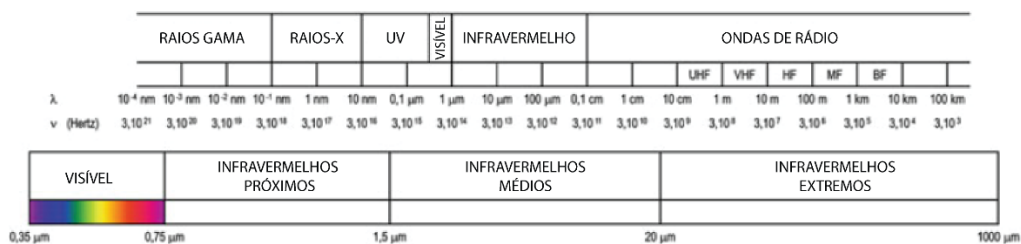


Figura 20 – Espectro eletromagnético, adaptado de [19]

A termografia baseia-se em 3 leis fundamentais que traduzem o comportamento do corpo negro. A lei de Planck, a lei de Kirchhoff e a lei de Stefan-Boltzmann. A primeira descreve a intensidade da radiação emitida por um corpo negro. Segundo a lei de Kirchhoff, um corpo negro é capaz de emitir radiação para todos os comprimentos de onda, até ser estabelecido o equilíbrio termodinâmico, pelo que a energia emitida por um corpo tem de ser igual à energia por ele absorvida. A lei de Stefan-Boltzmann é resultante da integração da lei de Planck em todo o espectro. Esta permite calcular o total de radiação emitida por um corpo negro a uma certa temperatura. [19, 20, 22-24, 26].

As leis enunciadas são essenciais para compreender o comportamento de um corpo quando sobre ele incide radiação [26]. Contudo, a maioria dos corpos reais não possuem o comportamento ideal dos corpos negros, pelo que as leis anteriores necessitam de ter em consideração a emissividade [19, 24]. A emissividade é a propriedade que define a capacidade de emissão de um objeto real [19]. A emissividade de um corpo é calculada pela relação entre a energia irradiada pelo corpo e a energia irradiada por um corpo negro teórico à mesma temperatura, variando entre 0 e 1 [19, 20, 26]. Num corpo não negro, o somatório da radiação absorvida, refletida e transmitida é igual a 1 [19, 24]. A radiação emitida por um objeto real é dada pela seguinte equação:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1)$$

2.3.3. FATORES QUE AFETAM A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

Existem vários fatores que podem condicionar os resultados obtidos com termografia de infravermelhos. Um parâmetro importante é a emissividade [19, 24-26]. A emissividade varia de uma forma relativamente lenta para os materiais sólidos e apresenta flutuações bruscas para líquidos e gases. Para metais, a emissividade diminui com o comprimento de onda. A emissividade depende também da temperatura e do ângulo de observação. A variação da emissividade para materiais não metálicos (Figura 21) é quase nula quando os ângulos de observação variam entre os 0° e 60° com a normal à superfície e para materiais metálicos (Figura 22) não tem grandes variações entre 0° e 40° com a normal à superfície [24, 25].

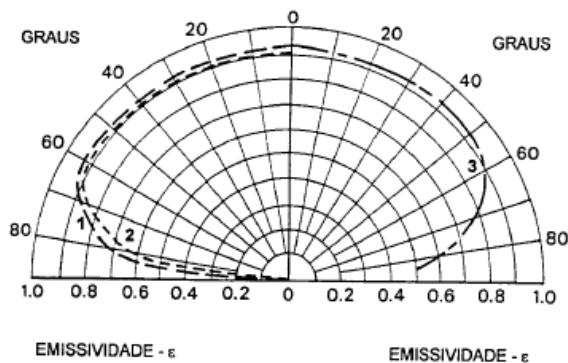


Figura 21 – Variação da emissividade em função do ângulo de observação para alguns não metais: madeira (1); papel (2); vidro (3) [24]

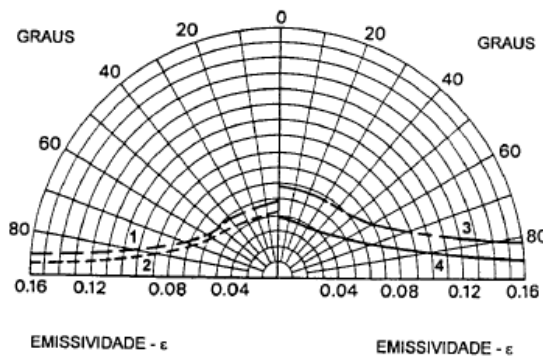


Figura 22 – Variação da emissividade em função do ângulo de observação para alguns metais: níquel polido (1); níquel baço (2); crômio (3); alumínio (4) [24]

A energia captada pelo recetor é resultante da sobreposição de três efeitos (Figura 23): o corpo reflete uma fração da energia emitida pelo ambiente, se é parcialmente transparente, transmite uma fração da radiação emitida pelo fundo e emite radiação própria. A refletividade não condiciona a correta análise dos resultados, mas pode alterar as imagens térmicas [24].

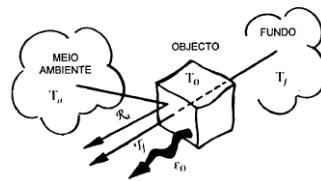


Figura 23 – Efeitos que intervêm na medição da radiação infravermelha [24]

Outros fatores importantes são a posição da câmara e a atenuação atmosférica [24, 26, 27]. A distância do alvo à câmara termográfica influencia a resolução do termograma e quanto maior a distância, maior a dificuldade em distinguir pequenas variações de temperatura devido à perda de resolução [24, 27]. A presença da atmosfera entre a fonte emissora e o sensor origina perturbação na medição. É recomendado que as medições sejam efetuadas a distâncias inferiores ou iguais a 10 m, de forma a que não seja necessário proceder às devidas correções [24].

O período do dia e as condições climáticas são de extrema importância para se definir quando se deve proceder ao levantamento termográfico pelo exterior. A leitura de temperaturas é geralmente mais precisa à noite, quando não há irradiação solar. Porém para alguns tipos de análises, como o descolamento do revestimento cerâmico, é desejável efetuar o levantamento com incidência solar sobre a fachada ou durante o período de arrefecimento da fachada. Não é aconselhável fazer um levantamento termográfico num dia com nevoeiro ou com nuvens baixas (as gotículas de água refletem a radiação infravermelha) e num dia com ventos fortes, já que estes têm um efeito de arrefecimento e, conseqüentemente, reduzem as temperaturas superficiais [21, 24-27]. As medições termográficas só devem ser realizadas com velocidades de vento inferiores a 25 km/h [21]. Nos ensaios pelo interior deve-se evitar correntes de ar (resultantes de portas ou janelas abertas) a incidir diretamente no local a medir. Para evitar interferências devido à radiação solar, as janelas devem ser tapadas algum tempo antes do ensaio [24]. A alteração das temperaturas superficiais originadas por fatores externos, tais como diferentes tipos de acabamentos, condições atmosféricas variáveis (precipitação, temperatura do ar, vento), a existência de áreas de sombra devido a elementos da envolvente (edifícios, árvores), a existência de fontes de calor (veículos, radiadores, equipamentos em funcionamento, pessoas) e áreas húmidas perto da zona de medição pode levar à incorreta interpretação dos termogramas [19, 21, 24-26].

2.3.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

A termografia de infravermelhos destaca-se por ser uma técnica de inspeção rápida, em tempo real e de longo alcance. Em adição, não requer fonte de iluminação extra, pelo que os ensaios podem ser realizados durante a noite, altura adequada para inspeção de grandes superfícies em que não existe contacto. É uma técnica não destrutiva (não danifica, não prejudica a estética, não origina detritos nem provoca pó) e representa um ensaio seguro para o técnico que o realiza, uma vez que a radiação envolvida no processo não é prejudicial à saúde [20, 24-26]. Outras vantagens são a possibilidade de visualizar na mesma imagem pontos frios e quentes ou áreas com diferentes emissividades, sem a necessidade de plataformas de trabalho como andaimes, permite a análise do comportamento de um edifício sem interferir com a vida dos utilizadores, tem uma enorme variedade de aplicações para o estudo dos edifícios e os equipamentos são atualmente mais acessíveis [19, 24, 25].

Apesar das inúmeras vantagens deste método, este também possui algumas limitações que podem influenciar os resultados obtidos. Limitações estas que são a dificuldade em obter um aquecimento

uniforme em grandes superfícies e em detetar anomalias muito profundas se não existir a imposição de um fluxo de calor intenso. Esta técnica é influenciada pelas variações da emissividade e refletividade, pelas condições atmosféricas e pelo sombreamento originado por obstáculos próximos. É necessário um diferencial significativo de temperatura entre a superfície e a temperatura ambiente para conseguir detetar anomalias e o operador ou técnico que realiza e interpreta os resultados deve ter uma elevada qualificação [20, 24-26].

2.3.5. TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS E MODELAÇÃO 3D

Recentes desenvolvimentos na modelação de edifícios e da sua informação, permitiram que as inspeções nos edifícios pudessem ser executadas de forma não destrutiva e mais eficiente [28]. Uma das dificuldades na termografia de infravermelhos pode ser perceber a tridimensionalidade do edifício através dos termogramas. A união da termografia com modelos BIM facilitará a análise do comportamento dos edifícios. É possível adicionar termogramas aos modelos, sendo estes adicionados às geometrias como uma textura. De forma a obter uma análise coerente, é recomendado o uso de uma escala fixa de temperatura, o que facilitará também a correspondência entre as cores e as temperaturas superficiais.

Através de plug-ins, é possível associar valores RGB a valores de temperatura, obtendo-se os valores de temperatura de cada ponto nos termogramas. Os modelos podem ser ainda mais ricos em informação e aumentar a sua utilidade através da adição de propriedades térmicas dos elementos construtivos aos mesmos. A captação de termogramas de uma mesma área em vários momentos no tempo permite gerar modelos BIM 4D, importantes para apoiar no diagnóstico energético dos edifícios, na avaliação do conforto térmico e na verificação das condições de construção [26].

Lagueta et al. [29] recorreram ao laser scanning como técnica de levantamento para gerar um modelo 3D com texturas e posteriormente adicionaram-lhe imagens RGB e termogramas. As fotografias RGB foram sempre tiradas na mesma posição que o laser scanner, ao contrário dos termogramas. A escala de temperatura foi fixa num intervalo de -20°C e 60°C. A metodologia proposta está esquematizada na Figura 24. Apesar do processo ser praticamente automático, foi necessário organizar a nuvem de pontos no software para definir a parede principal e a ordem dos pontos que definia cada superfície. O resultado obtido está ilustrado na Figura 25. Este método não é ainda adequado para edifícios de grandes dimensões ou para o interior devido à falta do processamento automático para gerar o modelo 3D termográfico [26, 28, 29].

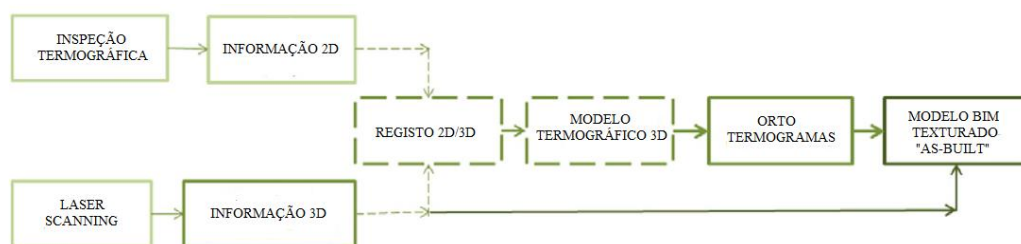


Figura 24 – Metodologia proposta para gerar um modelo 3D texturizado, adaptado de [29]

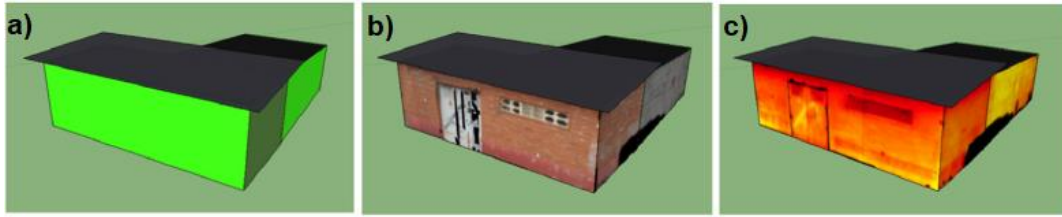


Figura 25 – Modelos BIM finais: a) sem texturas; b) texturizado com ortofotografias; c) texturizado com orto termogramas, adaptado de [29]

Noutro estudo realizado por diferentes autores, recorreu-se a um robot móvel para o mapeamento, no qual se combinaram imagens de laser scanner com imagens termográficas para gerar um modelo 3D termográfico de ambientes interiores. Após o levantamento e criação da nuvem de pontos, fez-se um orto termograma radiométrico do interior do edifício (Figura 26) [28].

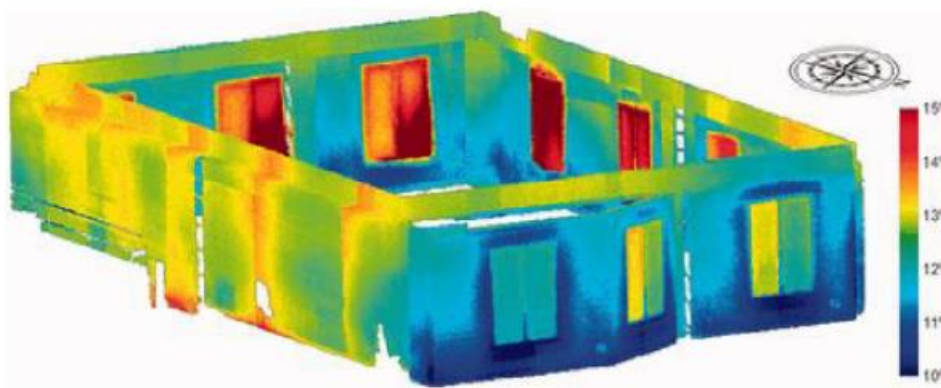


Figura 26 – Orto termograma do interior de um hall visto de fora [28]

3

DRONES NA INSPEÇÃO E
MODELAÇÃO 3D DE EDIFÍCIOS

3.1. DRONES

3.1.1. DEFINIÇÃO E POTENCIALIDADES

Os drones são também denominados como UAV ou UAS (*Unmanned Aerial Vehicle* ou *Unmanned Aerial Systems*) ou VANT (Veículo Aéreo não Tripulado) em português [26, 30-33]. São aeronaves que não necessitam de um piloto e são controladas remotamente ou voam em modo automático previamente programado [26, 32, 33]. Devido à ausência de piloto e consequente diminuição do tamanho dos drones, os custos associados a estes são bastantes inferiores comparativamente a outras aeronaves [26]. Os primeiros drones foram desenvolvidos na década de 1950 e eram de uso exclusivo militar [26, 33]. A primeira utilização para fins não militares deu-se em 1986 para monitorização de incêndios nos Estados Unidos [33].

Os drones possuem várias categorias e variam em peso, tempo de voo, capacidade de carga, alcance, dimensão e finalidade [26]. Dividem-se em 4 categorias (Figura 27) de acordo com o tipo de funcionamento: multirrotor (mais do que dois rotores), asa fixa, single-rotor (um só rotor) e híbrido de asa fixa [31].



Figura 27 – Tipos de drones, adaptado de [31]

Outra classificação relativa aos drones envolve o peso, a autonomia, altitude voo e alcance [33]. De acordo com estes 4 parâmetros surgem 9 categorias distintas (Figura 28), que constituem uma forma mais fácil de distinguir as características e possíveis funcionalidades dos drones. Para a inspeção de

edifícios recomenda-se o uso de micro drones ou mini drones, ou seja, com peso inferior a 150 kg [26, 33].

CATEGORIA	ACRÔNIMO	ALCANCE [km]	ALTITUDE VOO [m]	AUTONOMIA [h]	PESO [kg]
Micro	μ (micro)	< 10	250	1	<5
Mini	Mini	< 10	150 – 3000	< 2	150
Close Range	CR	10 – 30	3000	2 – 4	150
Short Range	SR	30 – 70	3000	3 – 6	200
Medium Range	MR	70 – 200	5000	6 – 10	1250
Medium Range Endurance	MRE	>500	8000	10 – 18	1250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	>250	50 – 9000	0,5 – 1	350
Low Altitude Long Endurance	LALE	>500	3000	>24	<30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	>500	14000	24 – 48	1500

Figura 28 – Categorias dos drones [33]

Drones multirrotor como os quadricópteros (4 rotores) possuem vantagens distintas, como robustez, alta manobrabilidade e custos de aquisição e manutenção baixos [31]. Estes podem ser manobrados em espaços pequenos e ser controlados por vários tipos de dispositivos como tablets, smartphones ou computadores. Permitem que se acople equipamentos LIDAR (*Light Detection and Ranging*), câmaras de alta qualidade, câmaras multiespectrais, câmaras termográficas de infravermelhos, gimballs e dispositivos de comunicação e iluminação. Este conjunto de propriedades fazem com que estes drones consigam analisar áreas extensas, observar zonas remotas ou inacessíveis sem comprometer a segurança do piloto, executar tarefas de forma mais rápida e precisa, com custos reduzidos e minimizando riscos [26, 30-35].

O uso de drones tem sido amplamente estudado para criação de modelos 3D [31]. Como foi referido no capítulo anterior, a fotogrametria e o laser scanning terrestre são ótimas técnicas de levantamento, porém ambas dependem do ângulo de visão o que pode resultar numa falha de informação. Com recurso a um drone equipado com uma câmara, é possível voar a baixas altitudes e cobrir todas as áreas de um edifício incluindo as inalcançáveis pelos métodos terrestres (Figura 29) [36]. Desta forma, é possível obter imagens de todo o edifício e obter uma nuvem de pontos mais completa, essencial na reconstrução tridimensional.



Figura 29 – Métodos de levantamento terrestre vs. levantamento com drone, adaptado de [36]

A utilização de drones equipados com os vários tipos de câmaras disponíveis no mercado, a preços acessíveis, com um sistema eficiente de captação de imagens, facilidade em manobrar e transportar, fez com que esta tecnologia tivesse um interesse crescente em várias áreas [33, 37]. Os drones são usados na fotografia, vigilância, geologia, geografia, meteorologia, arqueologia, agricultura, engenharia florestal, gestão de emergências e desastres naturais, controlo e gestão de tráfego, levantamentos aéreos e engenharia civil [26, 31, 32, 37].

Com a evolução tecnológica, as câmaras termográficas também sofreram mudanças em termos de tamanho (mais pequenas), custo (mais acessíveis) e qualidade (mais alta). A câmara termográfica de infravermelhos pode ser programada para captar imagens em intervalos de tempo e com sobreposição [26]. Fruto destas funcionalidades, nasce um campo de crescente interesse que é a utilização de câmaras de infravermelhos equipadas em drones para gerar modelos 3D termográficos através de software 3D de fotogrametria. Porém, a literatura ainda é escassa e sem muito detalhe do processo e metodologia para a existência de um método padronizado de levantamento termográfico com drone [35]. No entanto, com a junção das capacidades dos drones e das ferramentas BIM é possível perceber o futuro potencial que o uso de drones pode ter no setor da construção. Os drones poderão vir a ser usados durante a realização de construções novas (levantamento aéreo do terreno, gestão da construção, da qualidade e segurança), reabilitação de edifícios e acompanhar as restantes fases de um edifício como a manutenção e demolição [31]. As Figuras 30, 31 e 32 são 3 exemplos possíveis da utilização de drones durante o ciclo de vida de um edifício ou estrutura.

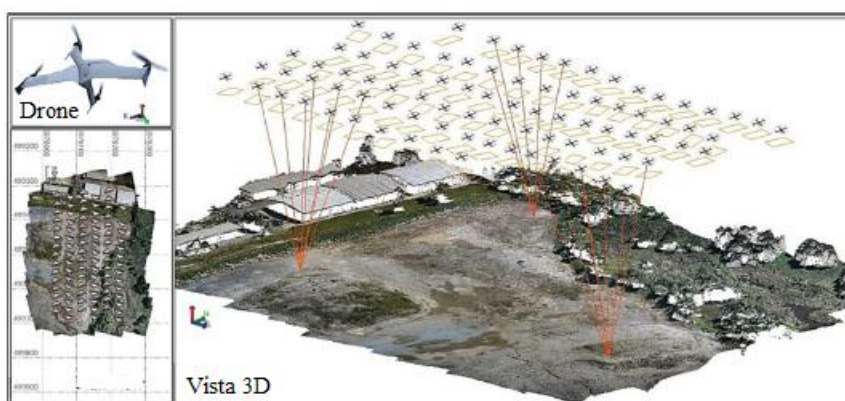


Figura 30 – Levantamento topográfico com recurso a um drone, adaptado de [31]

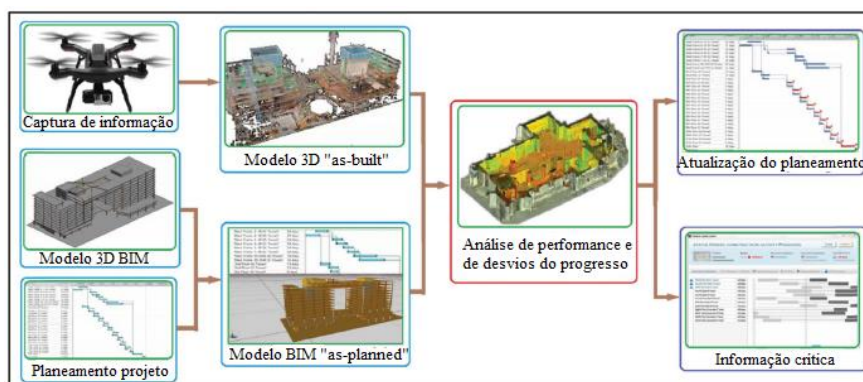


Figura 31 – Fluxograma de monitorização da evolução da obra através do uso de nuvens de pontos captadas com drone e um modelo BIM, adaptado de [31]

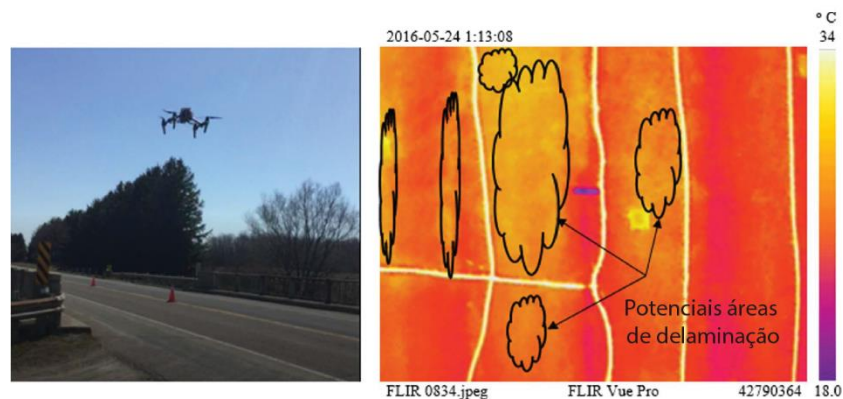


Figura 32 – Captação de termogramas para detecção de potenciais áreas de delaminação com um drone, adaptado de [32]

No planeamento urbano e gestão das cidades, esta tecnologia é muitas vezes usada para a criação de modelos 3D. Os drones, quando equipados com câmaras de infravermelhos, são também usados para obtenção da distribuição das temperaturas nas superfícies, uma fonte de informação importante para análise das cidades [37]. Outra aplicação recorrente da câmara térmica com drone é na inspeção de centrais fotovoltaicas [26].

Os drones têm potencial para várias aplicações na engenharia civil, devido à possibilidade de voos pré-programados e à sua capacidade de recolha de informação a baixa altitude (maior qualidade obtida) e em zonas remotas. A capacidade de levantar voo na vertical não exige áreas suplementares de operação e a possibilidade de ficar suspenso num ponto fixo é essencial para a inspeção. Dispositivos com FPV (*First Person View*), permitem aos utilizadores ver imagens em tempo real durante o voo [32]. Porém, sendo a engenharia civil uma área de lenta adaptação às novas tecnologias emergentes, principalmente o setor da construção, existe ainda pouca adesão ao uso dos drones [31].

Algumas limitações relativamente ao uso de drones relacionam-se com a legislação rigorosa e a necessidade de pilotos formados. Em adição, um voo pode ser facilmente comprometido devido a condições climatéricas adversas (ventos fortes, chuva intensa) e a autonomia reduzida das baterias [31].

3.1.2. RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL A PARTIR DE DRONES

Para efetuar uma reconstrução tridimensional a partir de um drone é necessário entender os conceitos e limitações da fotogrametria, da termografia e do método SfM que foram descritos no capítulo 1. Outro passo importante consiste na aquisição de experiência através de estudos realizados.

Tkac et al. [30] procederam ao levantamento de um edifício em “L” com o *Falcon 8* que possui uma câmara RGB de 36 megapixéis. O edifício possui 20 metros de altura e foram realizados 2 voos distintos. Um em modo automático a 70 metros de altura e outro em modo manual a 3 alturas distintas em torno do edifício. Em modo automático a operação demorou 3 minutos e obteve-se um total de 100 imagens verticais. Em modo manual, foram retiradas 950 fotografias num espaço de 2 horas. Neste estudo os autores relatam que o peso do drone (2,8 kg), o tempo frio (5°C) e ventos fortes de 54 km/h tiveram um enorme impacto na duração da bateria do drone. A autonomia obtida foi de 7 minutos, pelo que em 2 horas de voo repôs-se um total de 10 baterias [30].

Anwar et al. [34] aplicaram o uso de drones para a monitorização de uma construção. Foram realizados sempre 4 voos a diferentes altitudes com ângulos de observação diferentes. O 1º voo deu-se a 30 metros

de altura com ângulo da câmara a 0 graus, o segundo a 20 metros de altura e com um ângulo de 80 graus, o terceiro a 30 metros de altura e com um ângulo de 45 graus e o quarto a 50 metros de altura e com um ângulo de 30 graus. A união do modelo obtido com o levantamento através de um drone e o modelo BIM existente permitiu a avaliação do decorrer da obra e consequentemente tornou-se numa fonte de informação para ajudar na tomada de decisões [34].

Russo et al. [36] fazem uma comparação entre a fotogrametria com drone e um laser scanner terrestre para um levantamento de uma fachada de um edifício histórico. O drone foi o *DJI Spark* com uma resolução de 3968 por 2976 pixéis. A distância entre o drone e a fachada foi de 13 metros e o voo foi efetuado de forma manual. O levantamento demorou 30 minutos e ao todo retiraram-se 70 fotografias. A câmara foi usada na horizontal e usou-se 80% de “overlap” (ao longo do trajeto do drone) e 60% de “sidelap” (eixo oposto ao “overlap”). Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que o uso de drones, como técnica de levantamento, tem a qualidade exigida e necessária [36].

Gaspirini et al. [38] realizaram 5 voos distintos para levantamento de áreas com interesse arqueológico. Quatro dos voos foram realizados a 120 metros de altura e outro a 20 metros de altura. O drone para o levantamento feito foi o *DJI Phantom 4 Pro* com uma câmara RGB de 20 megapixéis com resolução de 5472 por 3648 pixéis. O voo de 20 metros de altura corresponde ao levantamento de uma área de 0,21 hectares, enquanto os restantes voos correspondem a áreas entre os 7 e os 14,6 hectares. Os parâmetros utilizados em média de “overlap” e “sidelap” foram de 80% e de 75%, respetivamente [38]. Apesar deste estudo ter sido realizado para a área da arqueologia, os resultados obtidos demonstram que o uso de drones é adequado para o levantamento aéreo topográfico.

Biscarini et al. [39] é outro caso de uso de fotogrametria com drone para obtenção de um modelo 3D. A análise recai numa ponte romana e o drone usado foi o *DJI Phantom 3*. Foi realizado um levantamento da ponte que permitiu alcançar todos os pontos da estrutura e obter uma nuvem de pontos detalhada. Isto permitiu também, identificar informações como propriedades cromáticas, características das dimensões da estrutura, realizar a análise dos materiais de construção, incluindo a criação de um mapa detalhado de degradação [39].

Sestras et al. [40] recorrem ao uso da fotogrametria com drone para análise de um edifício com valor histórico e para avaliar as vantagens de um restauro. O levantamento foi feito com o *DJI Mavic PRO* que conta com uma câmara RGB de 12 megapixéis e um peso de 743 g. O voo a 35 metros de altura, durou menos de 20 minutos a uma velocidade aproximada de 11 km/h. Os parâmetros de “overlap” e “sidelap” foram de 85% e 80%, respetivamente. Usou-se o modo manual e o modo automático. No modo automático retiraram-se 312 ortofotografias e no modo manual 232 fotografias. Este artigo reforça as vantagens dos drones já enumeradas e descreve-os como uma forte alternativa aos métodos tradicionais [40].

Tarek Rakha et al. [35] apresentam um caso de estudo de reconstrução tridimensional com câmara termográfica. Para um voo em “strip pattern” é recomendado uma sobreposição de, no mínimo, 70% e para um voo em elítica, uma sobreposição de 95%. Outras recomendações são: em voos a 12 metros da superfície a captar, a diferentes alturas no trajeto elítico e em dias com temperatura estável e sem precipitação, deve existir uma diferença de 10 K entre o interior e o exterior e devem ser captadas entre de 1000 a 1300 imagens. Em cada voo elítico é recomendado o aumento da altura em 1.25 vezes. O drone utilizado foi o *DJI Inspire 1* com uma *FLIR Zenmuse XT*. Para obtenção da nuvem de pontos recorreu-se a 3 programas: *Agisoft Photoscan*, *Pix4D* e *DroneDeploy* (Figura 33) [35].

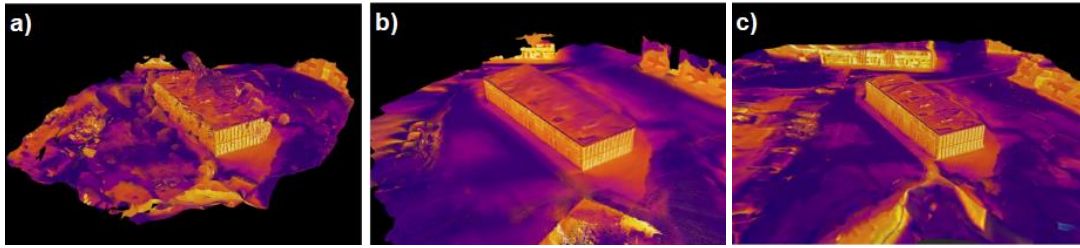


Figura 33 – Modelos termográficos obtidos pelos programas: a) *Agisoft Photoscan*; b) *Pix4D*; c) *DroneDeploy*, adaptado de [35]

Zheng et al. [41] realizam também uma reconstrução tridimensional com câmara termográfica de infravermelhos. O drone para efetuar o levantamento foi o *DJI Matrice 210 RTK V2 com uma FLIR Zenmuse XT*. A resolução escolhida foi a maior possível que é de 640 megapixéis por 512 megapixéis. O voo foi efetuado a 7 m/s, com um intervalo de captação de 3 segundos, com a câmara a 45 graus e uma sobreposição de 90%. Não é descrita a trajetória, mas o voo durou 40 minutos e obtiveram-se 743 imagens. O programa usado para gerar a nuvem de pontos foi o *Pix4D*. A Figura 34 representa o modelo tridimensional obtido [41].



Figura 34 – Modelo 3D obtido com o *Pix4D*, adaptado de [41]

A literatura existente é abundante para a reconstrução tridimensional com drones no âmbito do espectro visível, sendo escassa no âmbito do espectro infravermelho. Consequentemente, a reconstrução tridimensional do visível é uma alternativa que já começa a existir no mercado, com empresas especializadas no uso de drones. Em Portugal, a *GEODRONE*, a *APWDRONE* e a *DSI* são exemplos de empresas que realizam todos os seus trabalhos com drones e estas empresas não atuam só nas áreas da engenharia civil. Os serviços disponibilizados com maior interesse para o tema desta dissertação são: vistorias, inspeções (também com recurso a câmara termográfica), levantamentos topográficos, aplicações em arquitetura, engenharia e construção e a modelação 3D [42-44]. A Figura 35 é um exemplo dos trabalhos realizados pela *GEODRONE* [42].



Figura 35 – Modelo 3D da cidade de Loulé [42]

3.1.3. DRONES DISPONÍVEIS NO MERCADO

O mercado dos drones é imensamente vasto, porém as empresas com maior destaque neste mercado são a *DJI* e a *Parrot* [45]. A *senseFLY*, apesar de não se encontrar no top 3 do ranking, é uma subsidiária da *Parrot*, líder em drones de asa fixa e é uma das marcas encontradas na literatura existente para casos de estudo de inspeção com câmara termográfica [46]. A *DJI*, empresa chinesa, e a *Parrot*, empresa francesa, possuem produtos adequados às empresas de vários setores [47, 48].

A *DJI* divide os seus produtos em 4 categorias: consumidor, profissional, empresa e agricultura. A categoria de consumidor adequa-se mais ao uso pessoal e a profissional para profissionais de vídeo e fotografia. A categoria da agricultura possui drones específicos para proteção de culturas ou planeamento de missões. Na categoria de empresa, apresentam 4 subcategorias: energia, segurança pública, construção e infraestruturas. Para cada uma destas subcategorias existe uma área de aplicação e para cada uma destas a *DJI* faz a recomendação do drone e equipamento a acoplar ideal para desempenhar as funções desejadas [49].

A *Parrot* apresenta 3 modelos de drone em destaque: o *ANAFI USA*, o *ANAFI Thermal* e o *ANAFI*. Porém, esses 3 drones são indicados para as mais variadas áreas, sendo mais adequado o *ANAFI Thermal* para inspeção de edifícios e o *ANAFI* para inspeção do local de trabalho [50].

A *senseFLY* apresenta um modelo de drone diferente para as mais variadas indústrias, o *eBee*. O modelo do *eBee* adequado ao setor da engenharia é designado como *eBee X*. Este drone é de asa fixa, podendo voar a 110 km/h e possui uma autonomia máxima de 90 minutos, dependendo da câmara e da bateria [51].

A *DJI* e a *senseFLY* possuem variados sensores (LIDAR, RGB e térmica) da própria marca que são compatíveis com os seus drones [49, 51]. A Tabela 1 faz uma análise dos modelos existentes e sugeridos pelas marcas para a área da engenharia civil.

Tabela 1 – Drones para trabalhos na área da engenharia civil

Marca	Modelo	MTOM	Autonomia Máxima	Sensor RGB	Sensor Térmico	Preço Drone	Equipamentos	Preço Equipamento
SenseFLY	eBee X	1600 g	90 minutos	-	-	20 000,00 €	SenseFLY S.O.D.A	1274,56 €
							SenseFLY S.O.D.A	3398,82 €
							3D SenseFLY Aeria X	3313,85 €
							SenseFLY Duel T	3313,85 €
Parrot	ANAFI Thermal	315 g	26 minutos	CMOS 1/2.4" 21MP	FLIR Lepton 3.5 microbolometer	2 339,00 €	-	-
Parrot	ANAFI	320 g	25 minutos	CMOS 1/2.4" 21MP	-	699,99 €	-	-
DJI	Matrice 300 RTK	9000 g	31 minutos a 55 minutos (depende da carga que transporta)	960p (FPV)	-	11 216,11 €	ZENMUSE L1	Valor não anunciado
							ZENMUSE P1	6 200 €
							ZENMUSE H20	4 650 €
							ZENMUSE H20T	12 400 €
ZENMUSE Z30	9 200 €							
DJI	Phantom 4 RTK	1391 g	30 minutos	1" CMOS 20 MP	-	5 268,17 €	-	-

3.2. LEGISLAÇÃO DRONES

Antes de se efetuar um voo com um drone é necessário cumprir com a legislação e o “código drone” com o intuito do bom funcionamento do espaço aéreo e o decorrer das ações em segurança, quer para os utilizadores, quer para civis ou outras aeronaves que possam estar em operação no local.

Os regulamentos europeus atuais em vigor foram criados para padronizar os diferentes regulamentos dos Estados-Membros e regular a utilização civil de drones. A normativa europeia aplica-se a todas as aeronaves não tripuladas, quer estas sejam autónomas ou pilotadas remotamente e independentemente da sua massa ou utilização que lhes seja dada. Destas normativas, apenas estão isentas as “aeronaves de Estado” [52]. O Regulamento de Execução (UE) 2019/947 da Comissão, de 21 de maio de 2019 e o Regulamento Delegado (UE) 2019/945 da Comissão, de 12 de março de 2019 entraram em vigor a partir do dia 31 de dezembro de 2020, em Portugal.

A ANAC (Autoridade Nacional da Aviação Civil) é a autoridade nacional em matéria de aviação civil, pessoa coletiva de direito público, com a natureza de entidade administrativa independente, dotada de autonomia administrativa, financeira e de gestão, bem como de património próprio. É responsável pelas funções de regulação, fiscalização e supervisão do setor da aviação civil [53]. Na sua página da internet é possível encontrar os regulamentos europeus em vigor, notícias de relevância sobre a demais legislação, circulares e informação variada para ajudar a compreender conceitos, a conhecer as leis e os passos necessários para se voar com um drone. É recomendada a leitura integral dos regulamentos europeus atrás mencionados e da regulamentação nacional. A regulamentação nacional em vigor é o Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, de 14 de dezembro, o Decreto-Lei n.º 58/2018, de 23 de julho e a Portaria n.º 2/2021 - Diário da República n.º 1/2021, Série I de 04-01-2021, de 01 de janeiro de 2021 [53]. Para um melhor entendimento destas leis, irão ser abordadas as principais regras para se poder operar um drone legalmente.

Os operadores de UAS devem registar-se sempre que operem em categoria aberta com uma aeronave não tripulada com uma MTOM (*Maximum Takeoff Mass*) igual ou superior a 250 g, que, em caso de impacto, possa transferir a uma pessoa uma energia cinética superior a 80 Joules ou equipada com um sensor capaz de captar dados pessoais. Para operações na categoria específica devem-se registar os operadores de UAS independente da massa da aeronave não tripulada (UE 947 – Artigo 14º). Entende-se por operador qualquer pessoa singular ou coletiva que utilize ou tencione utilizar um ou mais drones. MTOM é a massa máxima da aeronave não tripulada, incluindo a carga útil e o combustível, tal como definida pelo fabricante ou pelo construtor, à qual a aeronave não tripulada pode ser operada (UE 945 – Artigo 3º). Após registo como operador de UAS, é necessário fazer o registo dos drones e definir os

pilotos remotos, que podem ser o próprio operador ou outro operador que faça parte da sua equipa [53]. Ou seja, todos os pilotos remotos têm que se registar como operadores primeiramente, mesmo que não possuam em sua posse nenhum drone [54]. Para efetuar o registo de operador de UAS, dos drones e a atribuição dos pilotos remotos é necessário aceder à plataforma eletrónica disponibilizada pela ANAC [53].

As operações com drones têm lugar nas categorias aberta, específica ou certificada. Uma operação em categoria aberta é aquela que é realizada com uma aeronave não tripulada com uma massa máxima à descolagem inferior a 25 kg e o piloto à distância assegurando que a aeronave não tripulada é mantida a uma distância segura das pessoas, sem sobrevoar ajuntamentos. O piloto à distância mantém sempre a aeronave não tripulada em VLOS (*Visual Line of Sight*), exceto se voar em modo “follow-me” ou ao utilizar um observador. Durante o voo, o drone tem de ser mantido a menos de 120 metros do ponto mais próximo da superfície da terra, exceto ao sobrevoar um obstáculo. Não pode transportar mercadorias perigosas nem deixar cair qualquer material. A categoria aberta divide-se em 3 subcategorias: A1, A2 e A3 (UE 947 – Artigo 4º). As restrições relativas às subcategorias de operação A1, A2 e A3 estão explicadas na Figura 36.

Drone		Operação		Operador do drone/piloto		
Classe	MTOM	Subcategoria	Restrições operacionais	Registo do operador do drone	Competência do piloto remoto	Idade mínima do piloto remoto
Construção caseira	< 250 g	A1 (também pode voar na subcategoria A3)	- pode voar sobre pessoas não envolvidas (deve ser evitado quando possível)	Não, a não ser que o drone possua câmara/sensor e não seja considerado um brinquedo	- não é necessário treino	Sem idade mínima
C0			- não voar sobre aglomerados de pessoas		- ler manual de utilizador	
C1	< 900 g		- não voar sobre pessoas não envolvidas (se acontecer, deve ser minimizado)	Sim	- ler manual de utilizador - completar treino online - passar exame teórico online	16
C2	< 4 kg	A2 (também pode voar na subcategoria A3)	- não voar sobre pessoas não envolvidas - manter distância horizontal de 30 m das pessoas não envolvidas (pode ser reduzido a 5 m se a função de baixa velocidade estiver ativa)	Sim	- ler manual de utilizador - completar treino online - passar exame teórico online - realizar e declarar aut o treino prático - passar no exame escrito na NAA (ou entidade reconhecida)	16
C3	< 25 kg	A3	- Não voar perto de pessoas - voar fora de zonas urbanas (distância de 150 m)	Sim	- ler manual de utilizador - completar treino online - passar exame teórico online	16
Construção caseira						

Figura 36 – Operações em categoria aberta, adaptado de [55]

Nesta figura é possível ver também a classe de drones, os requisitos e a idade mínima dos pilotos remotos, associados a cada subcategoria. As classes de drones são denominadas de C0, C1, C2, C3 e C4. A classe é atribuída de acordo com a massa, velocidade máxima e outras características de construção e funcionalidades como retorno automático, modo de velocidade baixa, etc. As classes irão ser automaticamente atribuídas aos drones pelos fabricantes de acordo com os regulamentos. Para mais informação sobre estas classes deve-se consultar o anexo do Regulamento Delegado (UE) 2019/945 [53].

Os drones já existentes não possuem marcação de classe europeia, mas foi reservado um período de transição para estes. Tendo em conta o TOM (*Take off Mass*), os drones sem certificação podem voar

dentro das classes existentes [52]. Estes podem continuar a operar na subcategoria A1 (menos de 500 g), A2 (menos de 2 kg) e A3 (menos de 25 kg) da categoria aberta até 01 de janeiro de 2022. Após esta data apenas operam na subcategoria A1 (menos de 250 g) e A3 (menos de 25 kg) da categoria aberta se colocados no mercado antes do dia 01 de janeiro de 2023 [54]. A Figura 37 possui um resumo dos drones mais usados atualmente em Portugal conforme a sua classe neste período de transição.

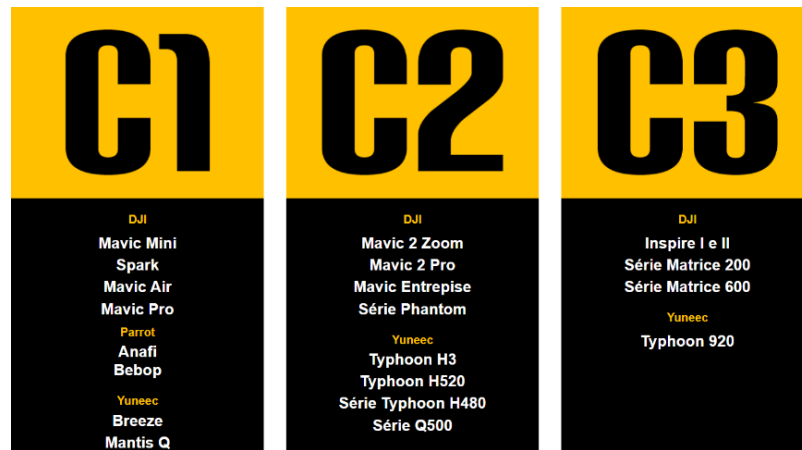


Figura 37 – Drones sem certificação durante o período de transição [52]

Conforme se pode ver na Figura 36, a categoria aberta exige formação na maioria dos casos. A única exceção é para a subcategoria A1, no caso de se usar um drone de construção caseira ou com marcação C0, sendo apenas necessário ler o manual para este último. Para os restantes casos da subcategoria A1 e a subcategoria A3 o piloto remoto carece de uma prova (certificado) de conclusão de formação e exame à distância A1/A3 (formação, exame à distância e certificado emitido por uma Autoridade Competente de qualquer Estado Membro da União Europeia). Para a subcategoria A2 o piloto remoto carece de um certificado de competência de piloto remoto A2 (formação, exame presencial e certificado emitido por uma Autoridade Competente de qualquer Estado Membro da União Europeia). Para tal, deve ser detentor de uma prova (certificado) de conclusão de formação e exame à distância A1/A3 e efetuar um curso de autoformação da subcategoria A3.

Contudo, a ANAC ainda não disponibilizou uma plataforma eletrónica de formação e exames à distância. A CIA n.º 15/2021 dispensa a formação teórica à distância dos exames de verificação de competência e da prova de conclusão da formação teórica à distância, bem como dos certificados de competência dos pilotos remotos nas subcategorias da categoria aberta e nos cenários de operação declarativos da categoria específica. Esta circular é válida até ao dia 31 de agosto de 2021, sendo apenas necessário assinar e andar sempre com a mesma em qualquer ação com um drone. A CIA n.º 15/2021 veio substituir a CIA n.º 1/2021 que caducou a 31 de maio de 2021, com a mesma finalidade [53].

Caso o operador ou piloto remoto desejem ter a formação mesmo antes da ANAC disponibilizar uma plataforma eletrónica de formação e exames à distância, é possível realizar os exames noutro Estado Membro da União Europeia. Espanha e Luxemburgo são dois países que disponibilizam a formação e o exame teórico à distância A1/A3. O exame presencial A2 envolve a deslocação ao próprio país e não é gratuito.

As operações com drones ocorrem em categoria específica sempre que uma das condições previstas na categoria aberta não for cumprida e o operador de UAS é obrigado a obter uma licença de exploração nos termos do artigo 12º do Regulamento de Execução (UE) 2019/947 (UE 947 Artigo – 5º) [53]. Pode-

se explicar a categoria específica como operações de risco alto, pelo que os operadores necessitam de requerer uma autorização especial por parte da ANAC, enquanto a categoria aberta é de risco baixo [52].

As regras específicas e detalhadas para a categoria aberta encontram-se no anexo A do Regulamento de Execução (UE) 2019/947 e no mesmo regulamento o anexo B e C para a categoria específica.

É considerada categoria certificada, a operação com drones que seja certificado nos termos do artigo 40º, nº 1, alíneas a), b) e c), do Regulamento Delegado (UE) 2019/945. É categoria certificada a operação que se realizar sobre ajuntamentos de pessoas, que envolva o transporte de pessoas ou de mercadorias perigosas, podendo consequentemente resultar num elevado risco para terceiros em caso de acidente. As operações com drones são também classificadas na categoria certificada sempre que a autoridade competente, com base na avaliação do risco prevista no artigo 11º, considere que o risco da operação não pode ser adequadamente atenuado sem a certificação do drone e do respetivo operador (UE 947 – Artigo 6º) [53]. A categoria certificada é considerada para operações de risco elevado em que são aplicadas as regras normais da aviação clássica [52].

A Portaria n.º 2/2021 do Diário da República n.º 1/2021, série I de 04-01-2021, de 01 de janeiro de 2021 e o Decreto-Lei n.º 58/2018, de 23 de julho referenciam o dever dos operadores de UAS de contratar um seguro obrigatório de responsabilidade civil para os danos patrimoniais causados por drones cuja respetiva aeronave tenha uma massa máxima operacional superior a 900 g. As coberturas, condições e capitais mínimos do contrato de seguro são regulados por portaria dos membros do Governo responsáveis pelas áreas das finanças e da aviação civil. A submissão da informação e do comprovativo de contratualização do seguro deve ser feita na plataforma eletrónica de registo antes do início da utilização de um drone por parte do operador [53].

Para efetuar qualquer monitorização ou levantamento (captação de imagens mesmo que não divulgadas) e qualquer aeronave não tripulada que possua sistema FPV obriga a requerer uma autorização à AAN (Autoridade Aeronáutica Nacional), de acordo com a Portaria n.º 358/2000, de 20 de junho. A realização de voos noturnos também obriga à realização de um pedido à AAN. O pedido é realizado pelo operador ou piloto remoto na plataforma da AAN e o deferimento ou indeferimento do pedido não é automático. Implica a intervenção dos assessores técnicos da AAN e, quando aplicável, o parecer ou coordenação com entidades externas, quer para efeitos de análise de aspetos relacionados com a utilização de espaço aéreo sob responsabilidade militar, quer de aspetos relacionados com a segurança nacional. Todos os pedidos devem ser efetuados com 10 dias úteis de antecedência [56]. Para ser possível fazer o pedido, é obrigatório já ter o registo na plataforma da ANAC porque é necessário preencher dados relativos ao piloto remoto e drone que são gerados ao efetuar o registo de operador e da aeronave.

Para o voo em si, é necessário colocar a matrícula atribuída ao drone no mesmo de forma visível e um dos requisitos para os novos drones é um novo sistema de transmissão a bordo em tempo real. A sua emissão deve incluir o número de registo do operador, o número de série do drone, a posição geográfica e altura acima do solo, direção e velocidade do drone e coordenadas de descolagem [52]. O Regulamento de Execução (UE) 2019/947 menciona o conceito de áreas geográficas onde as operações com drones podem ser expressamente permitidas, restritas ou excluídas por motivos de segurança operacional, segurança contra atos ilícitos, proteção da privacidade ou do ambiente. Os Estados-Membros podem proibir operações, sujeitar as operações com drones a normas ambientais específicas, permitir o acesso apenas a determinadas classes de drones ou permitir o acesso apenas a drones equipados com certas especificações, nomeadamente sistemas de identificação à distância ou sistemas de reconhecimento geoespacial (UE 947 – Artigo 15º) [52].

Quando se voa com um drone deve-se analisar previamente as condições de operação aplicáveis à utilização do espaço aéreo. Certas áreas geográficas possuem limites de altura de voo ou até mesmo

zonas proibidas. Caso se pretenda ultrapassar os limites impostos da altura de voo, voar em áreas sob jurisdição militar ou em zonas sensíveis que requerem autorização é obrigatório fazer o pedido à AAN. Em anexo do Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, apesar da fase transitória, é permitido consultar as áreas geográficas relativas aos aeroportos nacionais. O artigo 3º do mesmo regulamento apresenta regras gerais de operação que devem ser lidas e adotadas.

Dada a vasta informação a reter e por vezes de difícil compreensão, a ANAC lançou uma campanha denominada “Voa na Boa” que tem como objetivo apresentar a regulamentação para a utilização responsável de drones. Esta campanha está a ser realizada nas redes sociais com informação constante a ser apresentada e para esclarecimento de dúvidas. Outra ferramenta muito importante desta campanha foi a criação de uma aplicação para smartphones. A aplicação *Voa na Boa* possui um mapa com as áreas geográficas, informação sobre limites, proibições e sobre procedimentos a tomar para cada uma dessas áreas (Figura 38). Dentro da aplicação é ainda possível consultar o regulamento de drones, o guia de utilização do espaço aéreo e o código drone criado pela ANAC com as regras básicas do que fazer e não fazer.

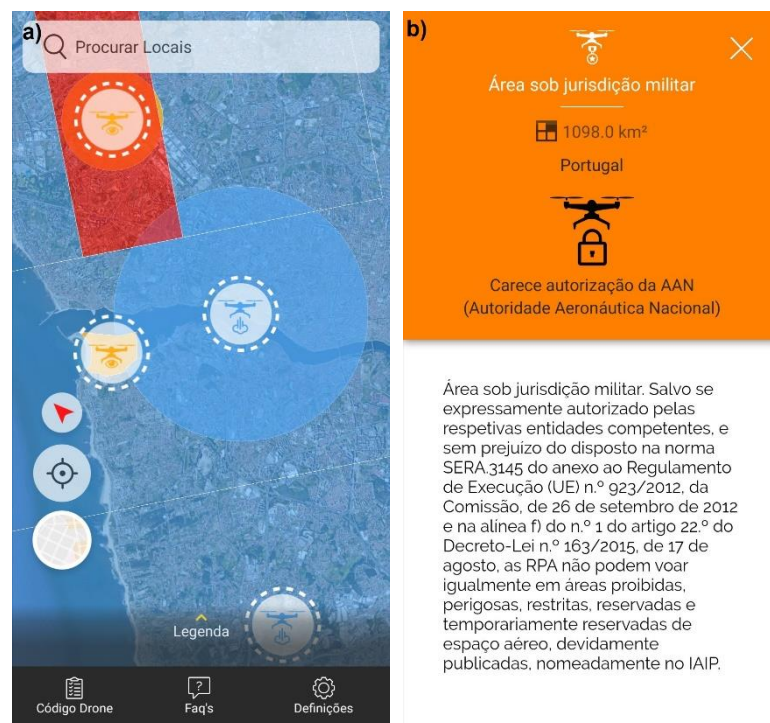


Figura 38 – Aplicação *Voa na Boa*: a) mapa com as áreas geográficas; b) instruções de como proceder para uma área sob jurisdição militar

4

METODOLOGIA DE ENSAIO E TRATAMENTO DE DADOS**4.1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO**

O caso de estudo para o desenvolvimento deste trabalho é uma moradia com 3 pisos e 10 m de cota máxima, construída num lote de 728 m² localizada em Pedroso, Vila Nova de Gaia (Figura 39). As paredes exteriores têm a seguinte constituição, do exterior para o interior: tijolo maciço de 11 cm, caixa de ar de 3 cm, poliuretano projetado com 3 cm e tijolo furado de 20 cm. Os envidraçados são em vidro duplo (6+6 mm), aplicado em caixilharia de alumínio com corte térmico. A maioria dos envidraçados possui dispositivos de proteção solar, nomeadamente proteção interior constituída por portada em madeira e/ou cortinas de cor branca e estores de lâminas orientáveis em alumínio pelo exterior. A cobertura inacessível é do tipo invertida, constituída por 5 cm de godó, 6 cm de poliestireno expandido extrudido, impermeabilização com telas asfálticas (2 camadas) e uma camada de forma em betão leve com 8 cm, sobre laje aligeirada de 28 cm. As coberturas acessíveis também são invertidas, diferindo apenas na camada de proteção, que é neste caso constituída por lajetas de granito com 3 cm de espessura. A casa possui um sistema de aquecimento central por radiadores apoiado por painéis solares e com caldeira mural.

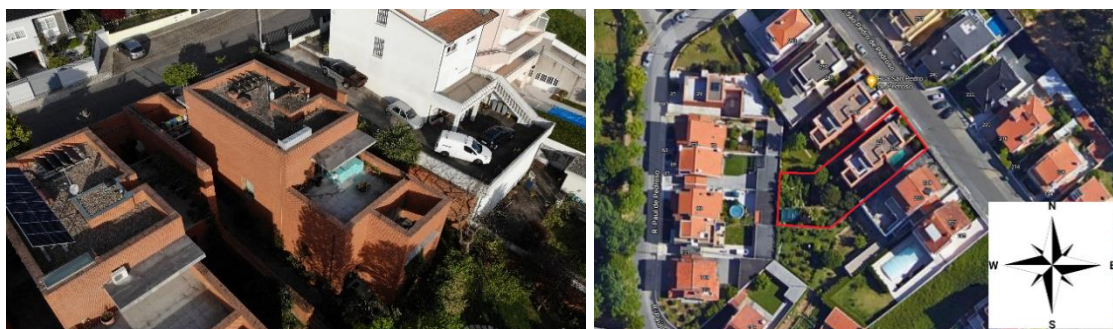


Figura 39 – Caso de estudo

No 1º quadrante (Norte – Este), com centro na moradia, para além dos postes de baixa e tensão ao longo da rua, existem outras moradias a uma distância mínima de 16 m e com uma altura máxima de 12 m. Para o 2º quadrante (Este – Sul), a fachada a sudeste encontra-se apenas a 5 m de distância do terreno da moradia adjacente, em que a cota do terreno se encontra a aproximadamente 6 m de altura em relação à cota do terreno da moradia do caso de estudo. A altura máxima da moradia adjacente é aproximadamente de 15 m. No 3º quadrante (Sul – Oeste) existe um poste de média tensão com cerca

de 20 m de altura a 30 m de distância do ponto mais próximo da moradia. Todas as outras moradias neste quadrante possuem uma altura inferior à do caso de estudo, em que a mais próxima está a 38 m de distância. Por último, no quarto quadrante (Oeste – Norte) a moradia adjacente possui exatamente as mesmas características que o caso de estudo, pelo que apenas existem moradias com altura superior a 23 m de distância, com uma altura máxima de 8 m.

4.2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

De modo a cumprir com os objetivos pretendidos para este trabalho, foram usados dois equipamentos distintos: uma câmara termográfica terrestre e um drone com câmara RGB e termográfica.

A câmara termográfica terrestre é a *Fluke TIS60+* (Figura 40). Esta câmara possui uma resolução de 320x240 pixels com uma banda espectral entre os 7.5 e 14 μm . Permite conhecer as temperaturas de cada ponto (pixel) da imagem térmica (câmara radiométrica). Apresenta uma temperatura de funcionamento entre os -10°C e os 50°C e é dotada de tecnologia *IR Fusion* da *FLUKE* (junção da imagem visível e térmica). A câmara digital incorporada (RGB) tem 5 MP. A câmara permite a inserção de cartões micro SD, além dos 4 GB que oferece de memória interna. O seu display de 3.5 polegadas indica a correção de emissividade e a compensação de temperatura refletida. Possui 26.7 cm de altura, 10.1 cm de largura e 14.5 cm de comprimento, com o peso de 720 g. Cada bateria tem uma autonomia de 4 horas. O valor deste equipamento ronda os 3 450€.



Figura 40 – Câmara termográfica *Fluke TIS60+*

A câmara da *Fluke* permite o ajuste da emissividade, tendo alguns valores já pré-definidos para alguns materiais mais comuns. A medição pode ser restrita a uma área pretendida e pode-se escolher o nível de fusão do infravermelho com o visível (*IR Fusion*). A informação é disponibilizada no display da câmara, onde se pode consultar a temperatura máxima e mínima, a temperatura do ponto para o qual a câmara está a apontar, a emissividade, a temperatura refletida escolhida e a escala de temperatura, disponibilizando 8 paletes de cor.

Os termogramas são exportados em formato *IS2*, pelo que para proceder à sua análise recorreu-se ao software gratuito da *Fluke*, o *Fluke Connect*. Este programa permite consultar todas as definições e parâmetros mencionados atrás durante a captação do termograma, mas também a sua edição, incluindo a paleta de cores. Para efeitos de análise e processamento, tem-se ao dispor ferramentas, como a indicação do ponto mais frio e mais quente e a criação de áreas com o formato desejado, para analisar

parcialmente a imagem. Automaticamente, para cada termograma é criado um histograma com a contagem do número de pixels para cada temperatura/cor e em todo o termograma é possível consultar a temperatura num dado ponto/pixel. Por último, o programa permite obter as imagens dos termogramas em formatos como JPEG, PNG ou ainda exportar num ficheiro em formato XLS ou CSV com a informação da matriz de temperaturas.

O drone é o *DJI Mavic 2 Enterprise Dual* com o pacote *Fly more Kit* (Figura 41). Possui um MTOM de 1 100 g com dimensões de 322x242x84 mm (aberto). É capaz de realizar trabalhos até 6 000 m de altura em relação ao nível do mar, com temperaturas de serviço entre os -10°C e os 40°C, resistência até 38 km/h de velocidade do vento e tem uma velocidade máxima de 72 km/h. Vem equipado com *DJI Airsense* que usa tecnologia ADS-B para avisar os pilotos da presença de outros drones ou aviões que possuam um transmissor ADS-B, através de sinais de rádio e satélite. Possui três modos de velocidade, sistema de navegação por satélite, 8 sensores de alta qualidade e 2 sensores infravermelhos para deteção de obstáculos. Tem um armazenamento interno de 24 GB e suporta cartões microSD até 128 GB. Vem equipado com um gimbal com estabilização de 3 eixos e um sensor de 12 MP 1/2.3" CMOS com imagens na resolução de 4056×3040 pixels (4:3) ou 4056×2280 pixels (16:9). Este sensor é capaz de filmar em 4K Ultra HD (3840×2160), 2.7K (2688×1512) ou Full HD (1920×1080). Esta versão *Dual* do *DJI Mavic Enterprise Series* tem também um sensor térmico radiométrico integrado da FLIR. Assim, é possível utilizar três modos de visualização: visível, infravermelho e a fusão entre a imagem térmica e a imagem visível, denominada de MSX (*Multi-Spectral Dynamic Imaging*). O sensor da câmara termográfica possui uma resolução de 160x120 pixels com uma banda espectral entre os 8 e 14 µm. As imagens possuem uma resolução de 640×480 pixels (4:3) ou de 640×360 pixels (16:9) e na opção de vídeo 640×360 pixels a 8.7 frames por segundo. A resolução obtida em vídeo e nas imagens térmicas é superior à resolução original do sensor graças ao processamento digital em tempo real. Este equipamento vem também com três acessórios opcionais, um holofote, um autofalante e um farol. A autonomia anunciada para condições ideais é de 29 minutos, sendo esta menor caso se utilize algum dos acessórios. O *DJI Mavic 2 Enterprise Dual* está atualmente descontinuado, com um preço aproximado de 3 000€, tendo a vir ser substituído pelo *DJI Mavic 2 Enterprise Advanced* (6 150€). O pacote *Fly more Kit* reforça a capacidade de voo com 2 baterias extras e traz um conjunto de hélices na eventualidade de ser necessário a substituição das mesmas. Com estes extras o conjunto drone mais *Fly more Kit*, ronda os 3 600€.



Figura 41 – Drone *DJI Mavic 2 Enterprise Dual*

Para visualização em tempo real das imagens transmitidas pelo drone e um melhor controlo, usou-se um smartphone acoplado ao comando remoto, com recurso à aplicação *DJI Pilot*. O smartphone é um *Huawei P20 Lite* com 4 GB de memória RAM. Para a criação dos modelos 3D usou-se um processador

Intel Core I5-6300HQ de 2.3 GHz, 8 GB de RAM e uma placa gráfica NVIDIA GeForce GTX 960M de 2 GB de memória dedicada.

O drone disponibiliza 5 paletes de cor: “HotMetal”, “Rainbow”, “Gray”, “ColdSpot”, “HotSpot”. A câmara da *Fluke* possui 8 paletes de cor: “Grayscale”, “Grayscale Inverted”, “Blue Red”, “High Contrast”, “Hot Metal”, “Ironbow”, “Amber” e “Amber Inverted” (Figura 42). Após a captação dos termogramas com as várias paletes, exploraram-se as restantes funcionalidades dos equipamentos.

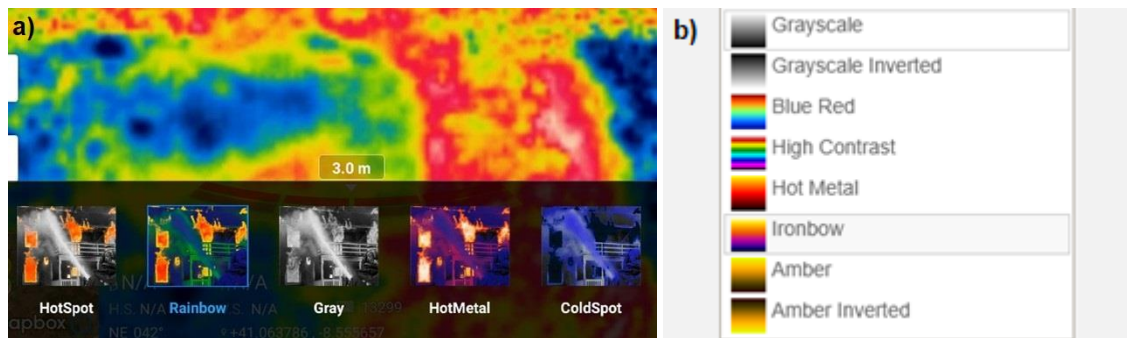


Figura 42 – Paletes de cor: a) drone; b) câmara da *Fluke*

É possível definir a escala de temperatura pretendida, medir a temperatura num só ponto ou medir a temperatura numa determinada área. É apresentada em tempo real a temperatura máxima, mínima, média e num ponto definido, conforme o tipo de medição que se esteja a efetuar. Outros dados relevantes que são fornecidos em tempo real são a altura de voo, distância desde o ponto de partida, distância a obstáculos e inclinação do gimbal.

As imagens captadas com o drone são sempre em duplicado, uma na gama do visível e outra dos infravermelhos, de acordo com o modo escolhido (“IR” ou “MSX”). As imagens são exportadas em formato JPG. Para análise das imagens térmicas obtidas, inicialmente recorreu-se ao software *DJI Thermal Analysis Tool*. Este programa deveria permitir manipular os termogramas de forma idêntica ao software da *Fluke* e aceder às temperaturas para cada pixel. Porém, após importar os ficheiros para o programa, as ferramentas apresentaram-se bloqueadas e sem nenhuma informação disponível. Sendo o sensor termográfico da *FLIR*, tentou-se fazer a análise através do software disponibilizado pela *FLIR* para análise de imagens térmicas. Neste programa apenas se obteve as ferramentas de zoom in, zoom out e rodar sem ser possível fazer qualquer tipo de manipulação no termograma.

Após uma pesquisa em vários fóruns sobre a possibilidade de efetuar um pós processamento das imagens térmicas captadas com o drone da *DJI*, verificou-se uma insatisfação generalizada dos utilizadores, pois é anunciado pela *DJI* que o drone possui uma câmara térmica radiométrica com parâmetros ajustáveis, o que se só se verifica no momento de captação da imagem, mas não numa fase posterior. Na tentativa de obter uma solução, entrou-se em contacto com a *DJI* por email. No entanto, esta entidade não deu uma resposta concreta ao problema exposto.

De seguida, recorreu-se ao *FLIR Image Extractor*. Esta ferramenta de *Python* é capaz de extrair meta data de formatos JPG, fornecendo os valores das temperaturas das imagens térmicas. Através da sua utilização apenas se obteve um ficheiro com informação sobre as propriedades do sensor, definições usadas na captação da imagem, localização, orientação do gimbal, etc. Nenhuma informação sobre temperaturas é gerada. A única resposta oficial que confirmou que o drone não permite fazer análise de pós processamento, chegou por parte da própria *DJI* através do seu canal do *YouTube* (Figura 43).

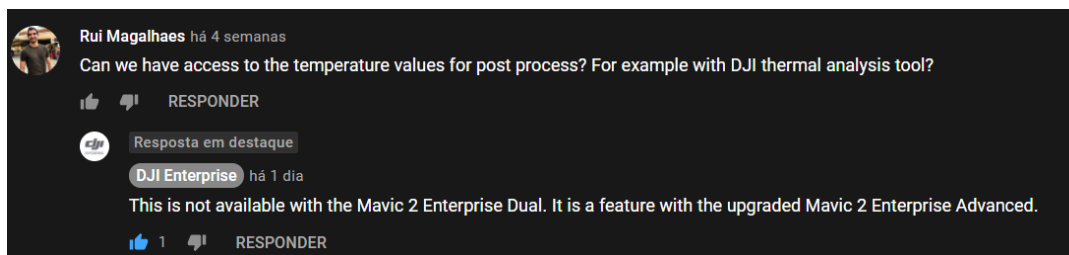


Figura 43 – Resposta dada pela DJI

Numa breve análise às várias imagens captadas com ambos os equipamentos, é possível observar que as paletes de cores “Rainbow”, “High Contrast” e “Blue Red” são as que proporcionam ao utilizador uma mais fácil visualização da variação da temperatura nos diferentes pontos. Isto deve-se ao maior número de cores diferentes disponíveis nestas escalas, enquanto que outras utilizam diferentes tons da mesma cor (Figura 44). São também paletes idênticas nos dois equipamentos. Por estes motivos, foram as paletes selecionadas como predefinição para os ensaios realizados, sendo o “Blue Red” mais adequado para interiores e “High Contrast” para o exterior.

Quando se recorreu ao modo MSX com o drone, em algumas imagens foi possível observar uma translação da imagem visível face à térmica. Esta translação pode ser corrigida através da aplicação durante o voo.

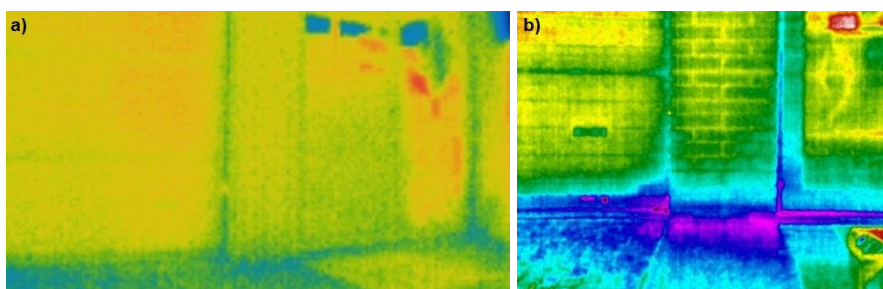


Figura 44 – Palletes de cor: a) “Rainbow”; b) “High Contrast”

Para efetuar a comparação entre a câmara da *Fluke* e o drone, teve-se em conta o número máximo de pixels, o histograma e gráfico das frequências acumuladas para cada termograma. Para tal, recorreu-se à ferramenta *Skimage*. O *Skimage* é uma ferramenta de processamento de imagem em *Python*.

Para a realização dos voos com o drone, foram registados todos os dados necessários relativamente ao drone, ao operador e ao piloto remoto na plataforma da ANAC, bem como a circular que dispensa a realização de exames práticos e teóricos. Posteriormente, foi feito um pedido na plataforma da AAN para levantar voo na zona do caso de estudo, tendo este sido aprovado (consultar anexos).

O drone insere-se na classe C2 e como o caso de estudo não se encontra em zona urbana, as operações decorrem na subcategoria A3 da categoria aberta. Todas as exigências da categoria aberta têm de ser cumpridas, bem como as restrições operacionais relativas à subcategoria A3. Para uma correta utilização do drone e de acordo com as regras de segurança para voos com drones, foi sempre verificado o estado das hélices e a sua correta acoplação aos rotores, o resumo do estado do drone ao entrar na aplicação e os avisos que a aplicação gere antes de levantar e durante o voo.

4.3. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

4.3.1. TESTE 1

O primeiro teste teve como objetivo tentar conhecer o valor da emissividade considerado pelo drone, dado que não é fornecido o seu valor predefinido nem é possível modificar este valor antes ou depois do voo. Como a emissividade varia de material para material, foram efetuados 3 ensaios para avaliar 3 materiais diferentes. Para cada um deles foi calculada a temperatura média numa área delineada por fita de alumínio, para ser perfeitamente visível nas imagens térmicas. Para cada ensaio usou-se o drone e a câmara da *Fluke* à mesma distância do objeto a medir e à mesma altura do solo. O esquema da Figura 45 traduz os ensaios realizados no Teste 1.

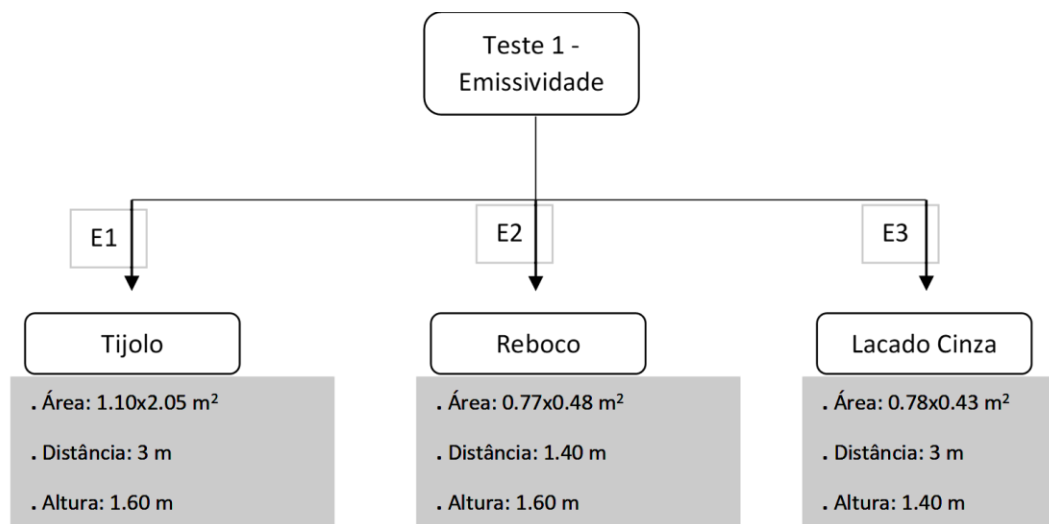


Figura 45 – Esquema dos ensaios do Teste 1

Os ensaios 2 e 3 (E2 e E3) foram realizados no interior da habitação enquanto o primeiro ensaio (E1), foi realizado no exterior. Após a realização dos ensaios, recorreu-se ao *Fluke Connect* para efetuar variações na emissividade das caixas definidas nas imagens captadas pela câmara da *Fluke* até se obter uma temperatura idêntica à medida no drone para os 3 materiais e para cada uma das respetivas caixas.

4.3.2. TESTE 2

O Teste 2 teve como objetivo analisar a capacidade de medição da temperatura e a qualidade do processamento da imagem dos termogramas captados pelo drone. Para tal, procedeu-se ao levantamento da fachada nordeste do edifício em estudo com os dois equipamentos, considerando o valor da emissividade para as medições com a câmara da *Fluke* em função dos resultados do Teste 1. Neste teste comparou-se a diferença de qualidade dos termogramas entre os dois equipamentos através do número máximo de pixels, histogramas e gráfico das frequências acumuladas para cada termograma. Também foi feita uma avaliação da capacidade de medição das temperaturas, em função da distância ao objeto a medir e da altura.

O Teste 2 divide-se em 8 ensaios (QM1-8). Para a realização destes ensaios, criou-se na fachada uma área de 1.10x2.05 m² com fita de alumínio, de modo a obter-se uma referência para efetuar as medições das temperaturas. Para cada ensaio foi feito o registo da hora e das condições climáticas (temperatura ambiente e humidade relativa do ar, velocidade do vento e intensidade da radiação solar), consultadas

no site da estação meteorológica do ISEP (*Instituto Superior de Engenharia do Porto*). De modo a cumprir com os objetivos deste teste variou-se a distância horizontal em relação à fachada e a altura em relação ao solo e foi medida a temperatura média dentro da área de referência. Os 8 ensaios são descritos na Figura 46:

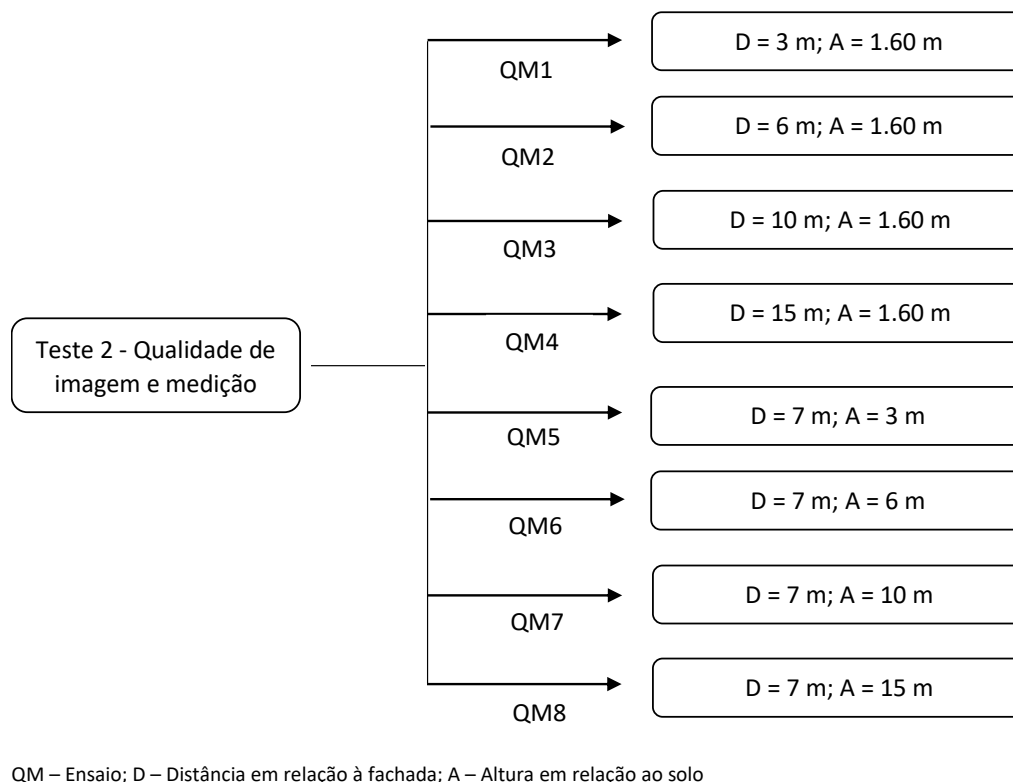


Figura 46 – Esquema dos ensaios do Teste 2

Após os ensaios, foram criados histogramas para cada termograma através da ferramenta *Skimage*. As imagens térmicas são guardadas como valores de pixels e cada valor de pixel/cor possui um valor de intensidade, brilho. A intensidade varia de 0 a 255, dividindo-se em 3 regiões - sombras (mínimo 0), meio tons e alta luz (máximo 255). Assim, um histograma traduz a distribuição de cada um desses valores de intensidade de cor pelo número de pixels que existem na imagem. Esta análise apenas foi realizada para os ensaios QM1, QM2, QM3 e QM4, pois estes foram os únicos ensaios em que se usou os dois equipamentos. Por fim, através da mesma ferramenta, gerou-se um gráfico de frequências acumuladas dos dois termogramas do ensaio QM1, para se obter o número máximo de pixels.

4.3.3. TESTE 3

O terceiro teste teve como objetivo a obtenção de um modelo 3D de um edifício a partir das imagens térmicas, sem a necessidade de criar um modelo 3D RGB, e a definição de um voo padrão para efetuar um levantamento termográfico com um drone. Para tal, foi feita uma análise de sensibilidade aos vários fatores que condicionam um voo e o uso de uma câmara termográfica num drone.

Ao todo foram realizados 27 ensaios neste teste. Analisou-se a influência das condições climáticas, da paleta de cores, da sobreposição de imagens, da inclinação do gimbal, da rota de voo, do uso da

tecnologia de fusão (MSX) de RGB com infravermelhos e da escolha da escala de temperatura com uso de linhas isotérmicas. Os levantamentos nestes ensaios incidiram apenas em 2 fachadas, a nordeste e a noroeste, para se diminuir o tempo dos voos, de forma a garantir condições climáticas o mais idênticas possíveis entre os diferentes ensaios, e minimizar a duração do processamento informático necessário às reconstruções tridimensionais.

As condições climáticas podem interferir nas medições e com isto prejudicar a qualidade dos termogramas. Nesta análise excluíram-se dias de chuva, pois a água poderá danificar o equipamento. Dias muito nublados também foram excluídos pela possibilidade iminente de chover. Com isto, foram realizados 3 voos, um com céu limpo (C1), outro com céu nublado (C2) e outro com vento forte numa das duas condições anteriores (C3), visto que o drone em utilização possui uma elevada resistência à velocidade do vento.

A quantidade de luz que incide num objeto é determinante numa reconstrução tridimensional RGB, pelo que foi importante perceber se nas imagens térmicas essa relevância se mantém. A luz depende da incidência solar nas fachadas em estudo, pelo que foram feitos 5 voos (C4-8) a diferentes horas do dia. Nestes voos procurou-se garantir condições climáticas idênticas para permitir uma comparação mais fiável dos resultados. As horas escolhidas coincidem com o nascer do sol, o ponto mais alto do sol, a meio da trajetória descendente, pôr do sol e ausência de sol (noite).

Por norma, as câmaras termográficas oferecem paletes de cores distintas, em que um esquema de cores específico pode ser mais adequado a uma determinada tarefa. Nas configurações da câmara térmica do drone é possível alterar o esquema de cores. Como já foi referido, são disponibilizadas 5 paletes diferentes e um esquema de cores pode criar pontos homólogos de mais fácil reconhecimento pelo software de reconstrução tridimensional (método SfM). Assim, efetuou-se um voo para avaliar o eventual efeito da utilização das diferentes paletes nos resultados obtidos (C9-13).

Uma reconstrução tridimensional depende também do número de imagens, ou seja, da sobreposição de imagens. A sobreposição de imagens mínima é intrínseca à qualidade das mesmas. Devido à baixa resolução das câmaras termográficas em comparação com as câmaras RGB admite-se que seja necessária uma sobreposição de imagem superior. Para avaliar este aspeto, fizeram-se 3 ensaios (C14-16), para 70%, 80% e 90% de sobreposição. Nestes ensaios usou-se a ferramenta de voo “Oblique” na aplicação da DJI (Figura 47), em que apenas basta selecionar a área pretendida e os parâmetros de voo para a rota ser automaticamente criada. Os voos foram executados a 26 m de altura, com uma margem de 6 m em relação à área a medir, a uma velocidade de 1 m/s e com um ângulo do gimbal de 45°.

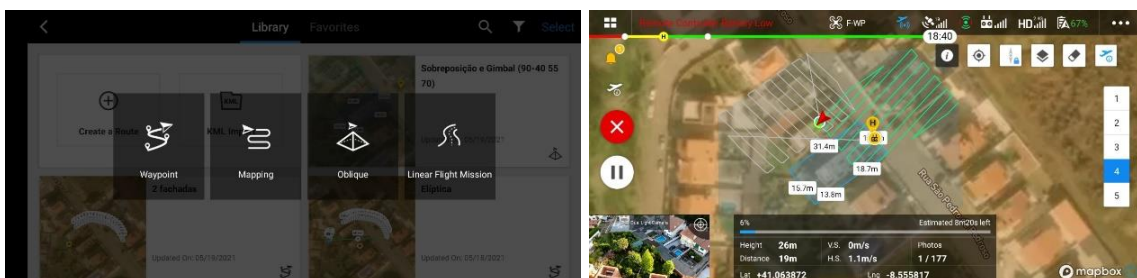


Figura 47 – Ferramenta de voo automático “Oblique” da aplicação DJI Pilot

O gimbal do drone permite ajustar o ângulo da câmara na vertical. Nos ensaios C17-19, efetuaram-se voos com diferentes inclinações do gimbal, para perceber se diferentes inclinações podem influenciar a capacidade de o software fazer a reconstrução tridimensional. As características destes voos são

semelhantes às dos ensaios efetuados para avaliar o efeito da sobreposição, considerando uma sobreposição de 90%.

A rota de voo é um fator extremamente importante a ter em conta, pois influencia a captação dos termogramas e a duração do ensaio, que é condicionada pela duração das baterias. Para perceber qual o impacto da rota, realizaram-se duas rotas, uma oblíqua e outra elíptica (C20 e C21). Para ser possível a comparação dos resultados dos dois ensaios, foram desenhadas rotas através da aplicação da *DJI* considerando sempre uma distância de 2.5 m entre pontos (Figura 48).



Figura 48 – Rota: a) oblíqua (C20); b) elíptica (C21)

Os equipamentos com sensor RGB e infravermelho permitem fazer automaticamente a fusão entre as duas imagens. Esta fusão poderá ser um elemento essencial para colmatar a qualidade mais baixa das câmaras térmicas. Assim, foram efetuados 3 ensaios (C22-24) com diferentes valores de fusão do visível no termograma.

De um modo geral, as câmaras de infravermelhos adaptam automaticamente as cores das imagens térmicas a uma determinada gama de temperaturas, em função das temperaturas superficiais que estão a ser medidas. Como ao longo do voo a envolvente muda, também as temperaturas superficiais podem mudar de uma forma muito acentuada. Consequentemente, também a escala de temperatura sofrerá alterações, atribuindo a cada cor diferentes gamas de temperaturas. Para estudar a importância de manter sempre a mesma escala de temperaturas, foram realizados 3 ensaios (C25-27), em que foi definida uma escala de temperatura fixa durante o voo de acordo com as temperaturas lidas.

Todos os voos, exceto na análise da sobreposição, da inclinação do gimbal e da rota de voo, realizaram uma trajetória elíptica a 20 m de altura desenhada na aplicação da *DJI*, de forma a captar as duas fachadas pretendidas (Figura 49). A paleta de cores predefinida para os levantamentos foi a “Rainbow” e a escala de temperatura ficou predefinida em modo automático. Com exceção dos ensaios à análise da influência das condições climáticas, realizaram-se os ensaios de cada tipo de teste no mesmo dia e no menor intervalo de tempo possível para garantir condições climáticas idênticas. Um resumo dos diferentes ensaios realizados encontra-se esquematizado na Figura 51.

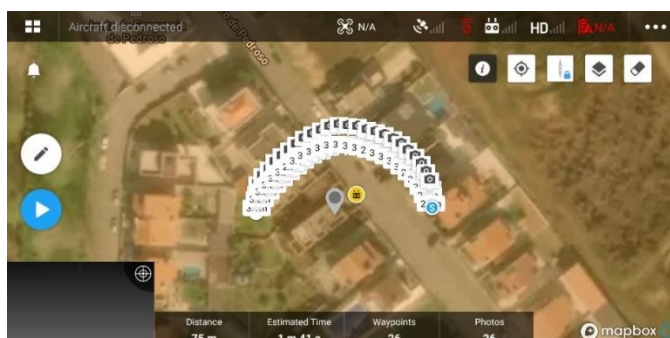


Figura 49 – Rota elíptica para os ensaios C1-13 e C22-C27

Para todos os ensaios registou-se a hora, e as condições climáticas (temperatura e humidade relativa do ar, velocidade do vento e intensidade da radiação solar) através da consulta dos dados da estação meteorológica do ISEP. Para que os voos decorressem de forma e em segurança elaborou-se um mapa dos obstáculos existentes dentro do raio de voo (Figura 50).



Figura 50 – Mapa de obstáculos existentes dentro do raio de voo

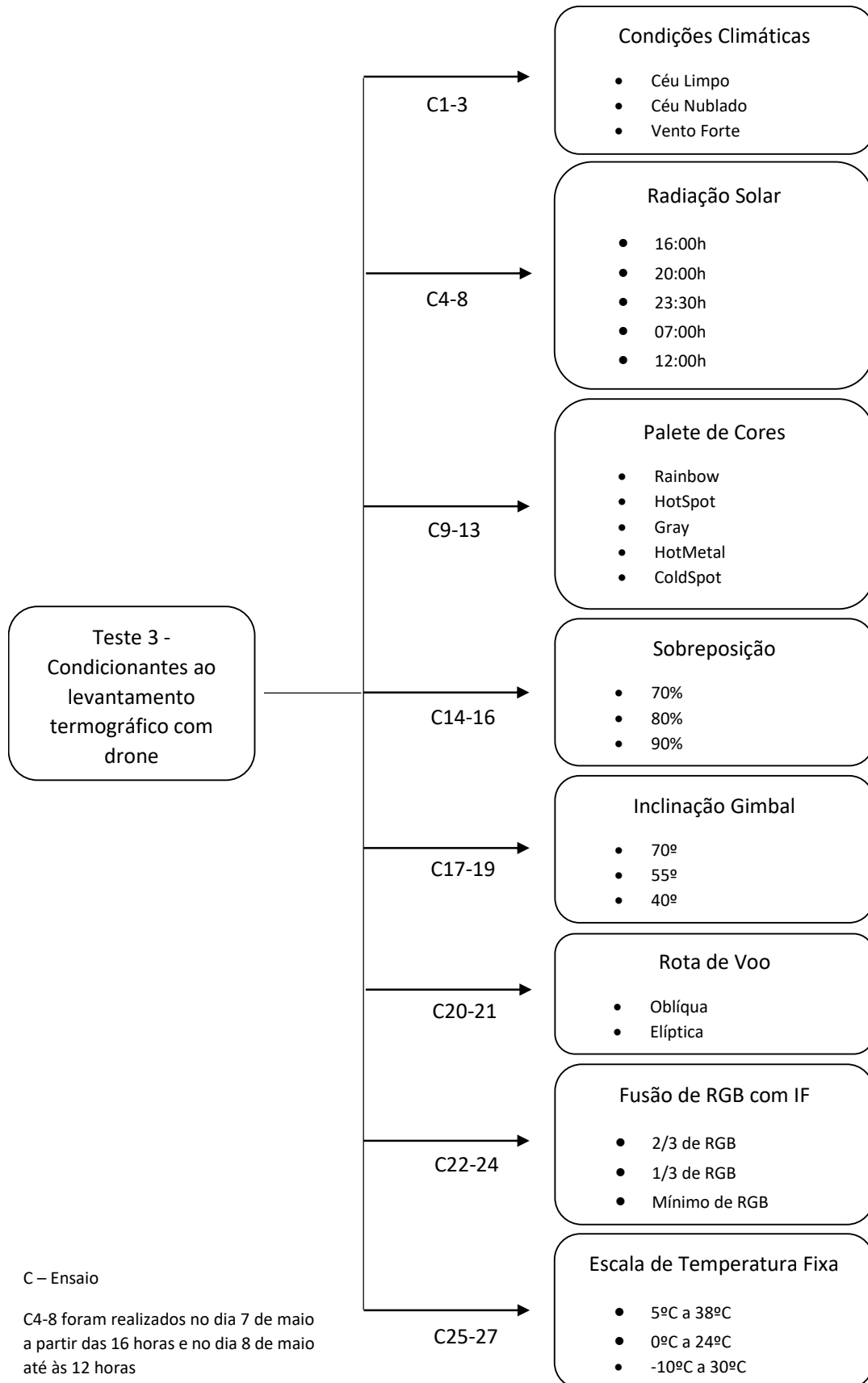


Figura 51 – Esquema dos ensaios do Teste 3

A comparação dos resultados foi efetuada através das reconstruções tridimensionais obtidas a partir dos termogramas captados em cada ensaio. Os modelos 3D foram obtidos através da técnica de reconstrução tridimensional SfM pelo programa *Colmap* e foram visualizados pelo programa *MeshLab*, ambos software gratuito e disponível online. Na criação dos modelos 3D usou-se qualidade de reconstrução média. A comparação dos modelos 3D gerados teve em conta o número de vértices da nuvem de pontos e, em alguns casos, o número de vértices e faces geradas da malha.

Com base nos resultados obtidos, realizou-se um levantamento final para obtenção do modelo 3D a partir das imagens térmicas, que poderá ser exportado para outras ferramentas, como é o caso das ferramentas BIM. Ao realizar-se o levantamento termográfico efetuou-se em simultâneo o levantamento com a câmara RGB. O levantamento com a câmara RGB teve como objetivo a comparação do tempo necessário para efetuar a reconstrução tridimensional entre um modelo RGB e um modelo térmico. Para a operação de levantamento e de reconstrução foi registado o tempo necessário para a sua realização.

5

RESULTADOS

5.1. TESTE 1

Para cada ensaio do teste 1 foi captada uma imagem do termograma em tempo real do drone e um termograma da câmara da *Fluke*. No programa da *Fluke* foram ajustadas as áreas de medição dos termogramas para as fazer corresponder à área selecionada em tempo real durante o voo com o drone. Por fim, variou-se a emissividade dos termogramas de maneira a igualar os valores obtidos com drone. As Figuras 52, 53 e 54 mostram a imagem visível da área avaliada e os respetivos termogramas, obtidos com o drone e a câmara da *Fluke*.

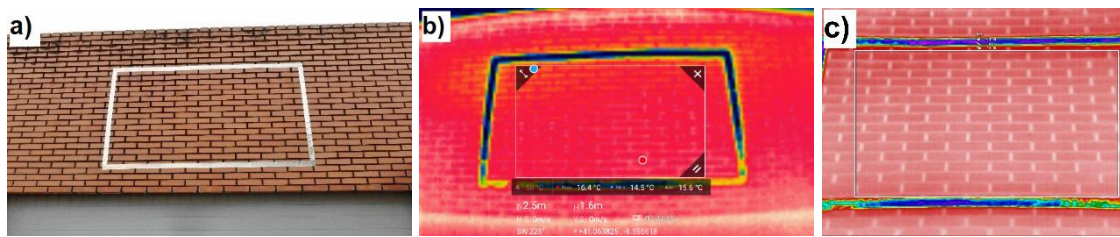


Figura 52 – Ensaio E1: a) área de estudo; b) termograma drone; c) termograma câmara *Fluke*

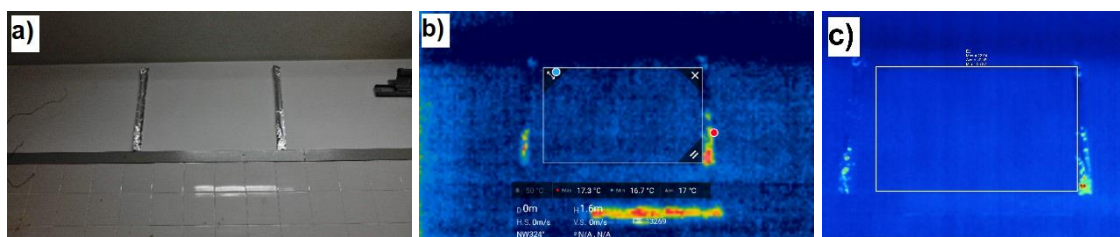


Figura 53 – Ensaio E2: a) área de estudo; b) termograma drone; c) termograma câmara *Fluke*

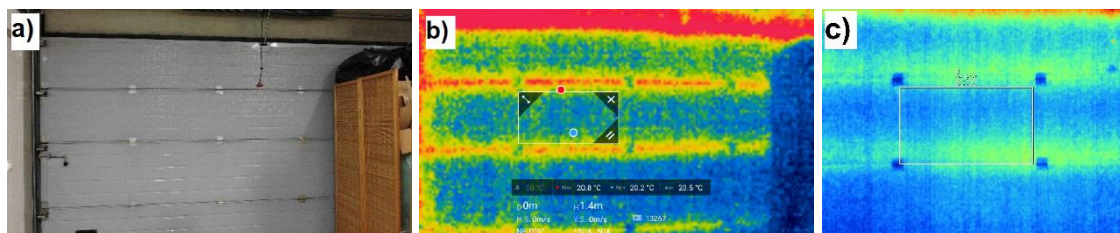


Figura 54 – Ensaio E3: a) área de estudo; b) termograma drone; c) termograma câmara *Fluke*

A Tabela 2 apresenta os valores da temperatura superficial obtidos nas medições com o drone, que não permite conhecer nem alterar a emissividade considerada durante a medição. Também apresenta os valores obtidos com a câmara da *Fluke*, considerando a emissividade referida na literatura para a superfície em estudo (ϵ_{real}) e ajustada de forma a que os valores da temperatura se aproximassem dos obtidos com o drone. Os valores utilizados para a emissividade real foram de 0.85, 0.94 e 0.92 para o tijolo, o reboco e o lacado cinza, respetivamente. Nos 3 ensaios, os valores medidos pelo drone são inferiores aos da câmara da *Fluke*. De acordo com a Equação 1, a emissividade é inversamente proporcional à temperatura. Portanto, como a temperatura medida pelo drone é inferior à medida pela câmara da *Fluke*, aumentou-se a emissividade nos termogramas da câmara da *Fluke*. Porém, mesmo com emissividade igual a 1 (valor máximo), não foi possível obter os mesmos valores medidos com o drone. A diferença entre os valores obtidos pelos dois equipamentos pode-se dever à baixa precisão do drone (dado não fornecido pela *DJI*) ou ao facto de o drone usar sempre o mesmo valor de emissividade, independentemente da superfície em estudo.

Tabela 2 – Valores da temperatura superficial para os ensaios do Teste 1

	E1	E2	E3
Drone (D)	15.6°C	17.0°C	20.5°C
Fluke ($F\epsilon_{real}$)	18.83°C	21.59°C	21.84°C
Fluke ($F\epsilon = 1$)	18.12°C	20.93°C	21.23°C
Diferença (D-$F\epsilon = 1$)	2.52°C	3.93°C	0.73°C

5.2. TESTE 2

Neste teste usou-se emissividade igual a 1 para os termogramas captados com a câmara da *Fluke*, por permitir uma melhor aproximação aos valores obtidos com o drone. A área em estudo foi a mesma do ensaio E1 do Teste 1, correspondendo ao interior do retângulo definido com fita de alumínio na parede de tijolo à vista da Figura 55. Foi captado um termograma com o drone, em tempo real com o drone e um termograma com a câmara da *Fluke* para os 4 primeiros ensaios do teste 2. No programa da *Fluke* foram ajustadas as áreas de medição dos termogramas para as fazer corresponder à área selecionada em tempo real durante o voo com o drone. As Figuras 56, 57, 58, 59 mostram os termogramas obtidos para os ensaios QM1 a QM4 com os dois equipamentos.



Figura 55 – Área de estudo para o Teste 2

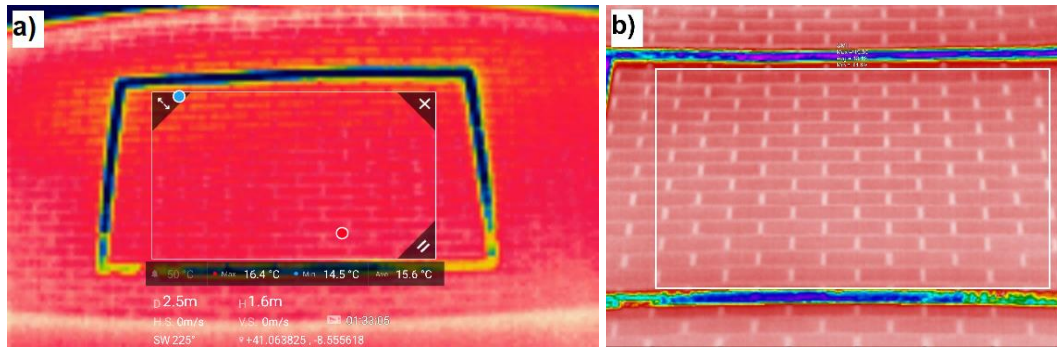


Figura 56 – Termograma obtido no ensaio QM1 com: a) drone; b) câmara da *Fluke*

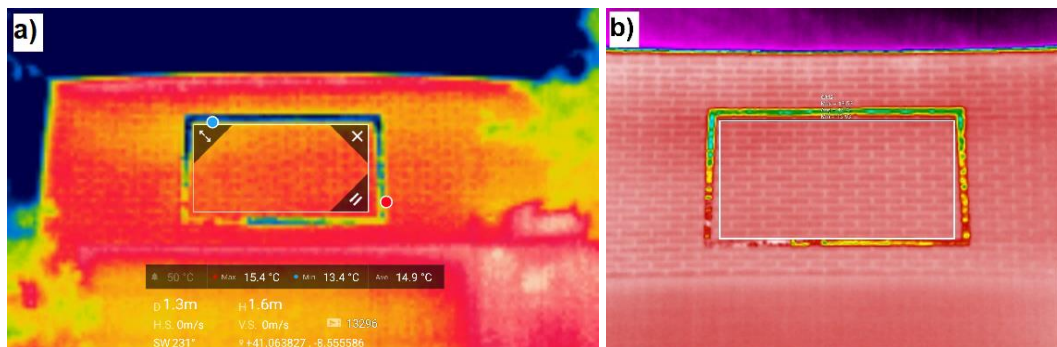


Figura 57 – Termograma obtido no ensaio QM2 com: a) drone; b) câmara da *Fluke*

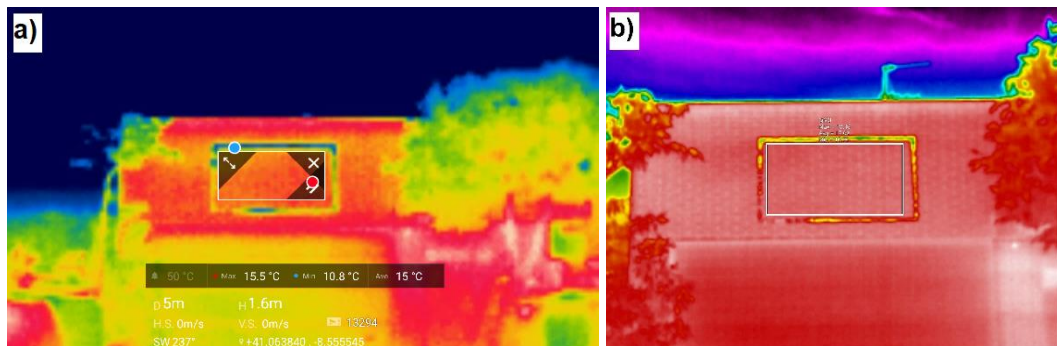


Figura 58 – Termograma obtido no ensaio QM3 com: a) drone; b) câmara da *Fluke*

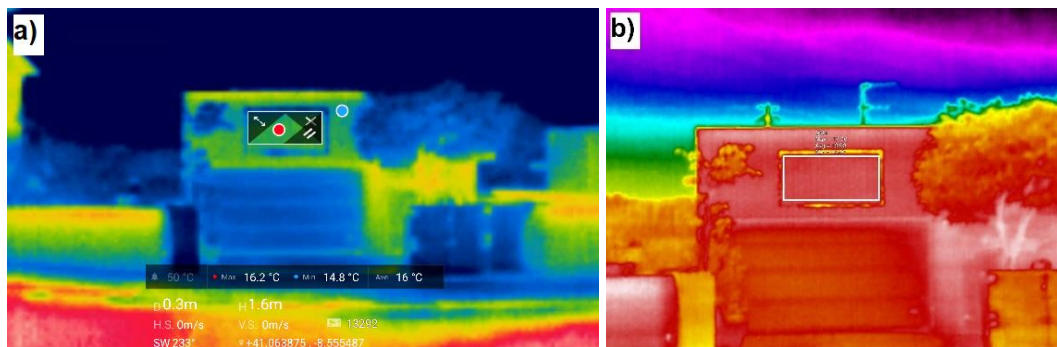


Figura 59 – Termograma obtido no ensaio QM4 com: a) drone; b) câmara da *Fluke*

A Tabela 3 mostra os valores das temperaturas médias da área previamente definida para os dois equipamentos, numa tentativa de avaliar o efeito nos resultados da distância do equipamento em relação à fachada, mantendo os equipamentos sempre à mesma altura do solo. Estes ensaios realizaram-se num espaço de tempo de 25 minutos, estando a fachada à sombra como é possível observar na Figura 55. Colocou-se na Tabela 3 a temperatura do ar registada antes de cada ensaio. Com a diminuição da temperatura do ar e a fachada à sombra, seria de esperar que houvesse uma diminuição da temperatura medida. Pode-se observar esse comportamento nas medições com a câmara da *Fluke*, mas não com o drone. A diferença entre as temperaturas obtidas com os dois equipamentos mantém-se semelhante à que ocorreu no ensaio E1 do teste 1, exceto para o ensaio QM4 devido à subida da temperatura lida pelo drone.

Tabela 3 – Valores médios da temperatura superficial para os ensaios QM1-4 do Teste 2

	QM1	QM2	QM3	QM4
Temperatura Ar	17.9°C	17.7°C	17.6°C	17.6°C
Drone (D)	15.6°C	14.9°C	15.0°C	16.0°C
Fluke (F)	18.12°C	17.75°C	17.62°C	16.60°C
Diferença (F-D)	2.52°C	2.85°C	2.62°C	0.60°C

Com recurso à ferramenta *Skimage*, criaram-se também para estes 4 ensaios, histogramas (Figuras 60, 61, 62, 63) dos termogramas para se poder analisar a quantidade de informação que os dois equipamentos conseguem fornecer. Através da análise dos histogramas, é notória a diferença entre os termogramas captados com o drone e com a câmara da *Fluke*. Nos termogramas do drone as classes de cores são em menor número, o que significa que não possuem transições suaves entre cores, podendo este facto dever-se à menor sensibilidade do drone na medição das temperaturas.

Os histogramas evidenciam também a diferença do número de pixels entre os dois equipamentos. Nos ensaios QM1 e QM2 o pico máximo do número de pixels para a câmara da *Fluke* é na casa das centenas de milhar enquanto que para o drone é na casa das dezenas de milhar (Figuras 60 e 61). Nos ensaios QM3 e QM4 tem-se um pico máximo na casa dos milhões para a câmara da *Fluke* e para o drone na casa das centenas de milhar (Figuras 62 e 63).

Por último, criou-se um gráfico das frequências acumuladas para os dois termogramas do ensaio QM1, que fornecem o número total de pixels em cada termograma (Figura 64). É de salientar que apenas se fez este tipo de gráfico para o ensaio QM1 porque o número total de pixels é uma propriedade intrínseca do sensor da câmara, pelo que se obteria o mesmo valor total para os restantes ensaios. Obtiveram-se aproximadamente, 1 475 200 e 691 300 pixels para a câmara da *Fluke* e para o drone, respetivamente. Estes números reforçam as diferenças entre os dois equipamentos, que já era visível através da simples observação dos termogramas.

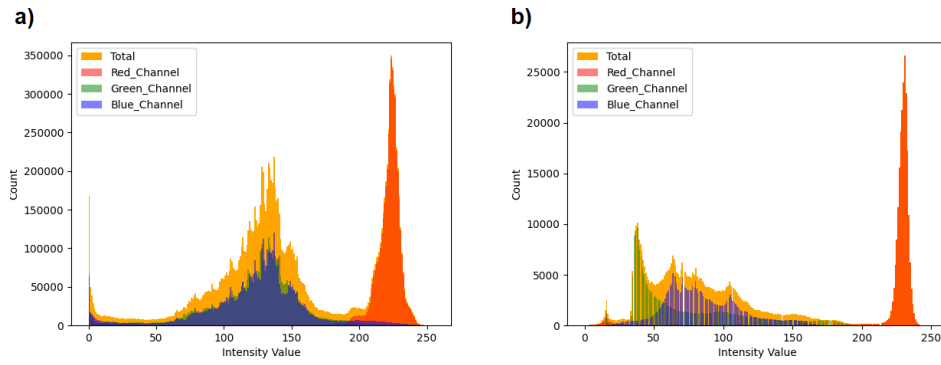


Figura 60 – Histograma do termograma para o ensaio QM1: a) da câmara da *Fluke*; b) do drone

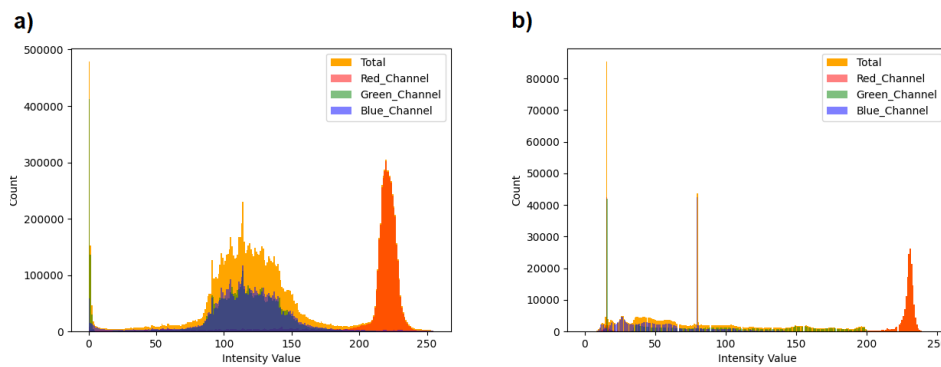


Figura 61 – Histograma do termograma para o ensaio QM2: a) da câmara da *Fluke*; b) do drone

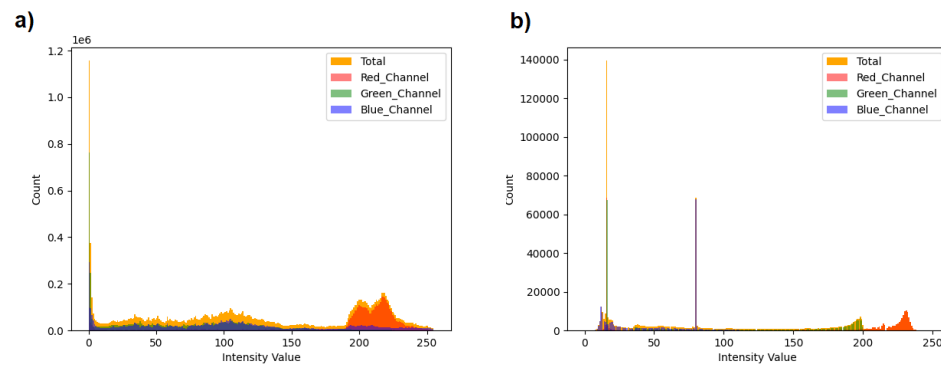


Figura 62 – Histograma do termograma para o ensaio QM3: a) da câmara da *Fluke*; b) do drone

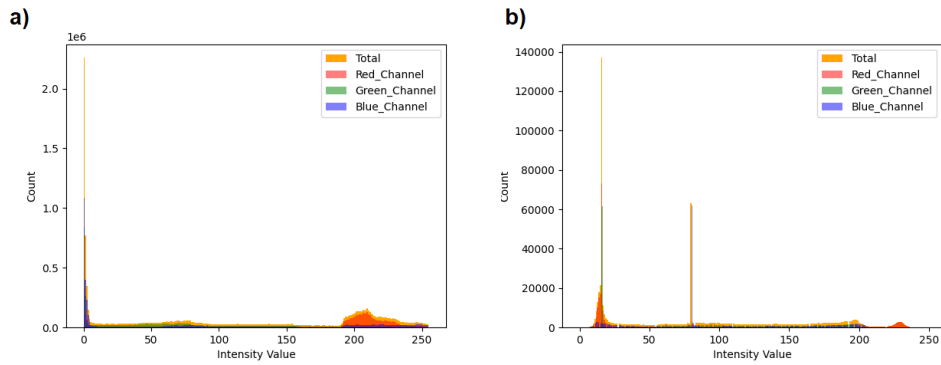


Figura 63 – Histograma do termograma para o ensaio QM4: a) da câmara da *Fluke*; b) do drone

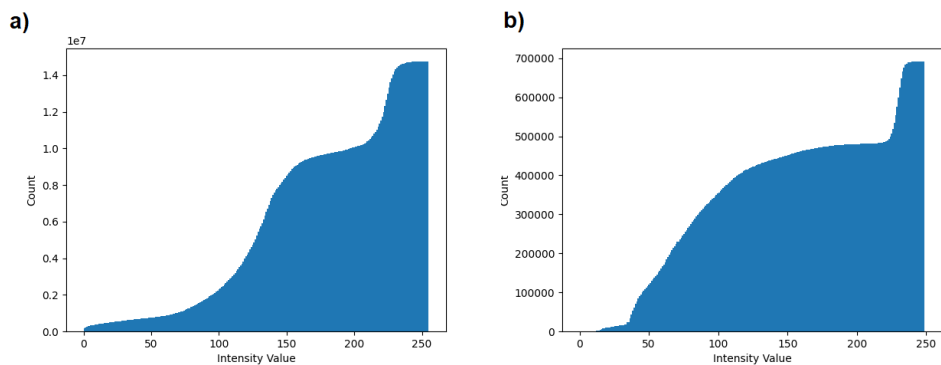


Figura 64 – Gráfico das frequências acumuladas para o ensaio QM1: a) da câmara da *Fluke*; b) do drone

Para os ensaios QM5, QM6, QM7 e QM8, apenas se tirou um termograma com a câmara da *Fluke* para se obter uma temperatura de referência da fachada, correspondente à temperatura superficial média da área em estudo (Figura 65), pois a medição em altura não seria possível de realizar com a câmara da *Fluke* e a medição com o drone para as 4 alturas definidas foram executadas num espaço de tempo inferior a 5 minutos, não havendo por isso uma variação significativa da temperatura da fachada. A Figura 66 corresponde aos termogramas obtidos com o drone para as alturas 3 m, 6 m, 10 m e 15 m, respetivamente.

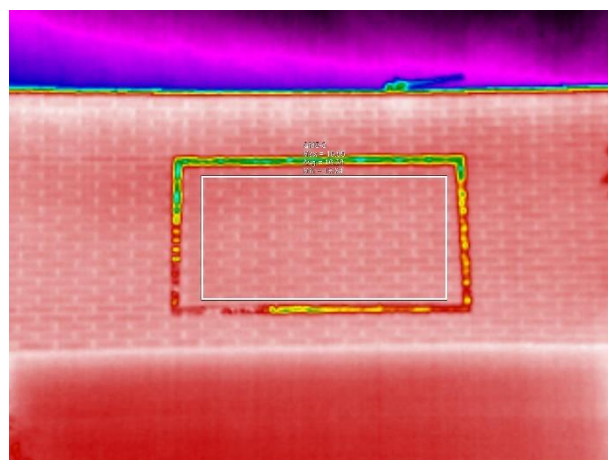


Figura 65 – Termograma obtido com a câmara da *Fluke* para os ensaios QM5-8

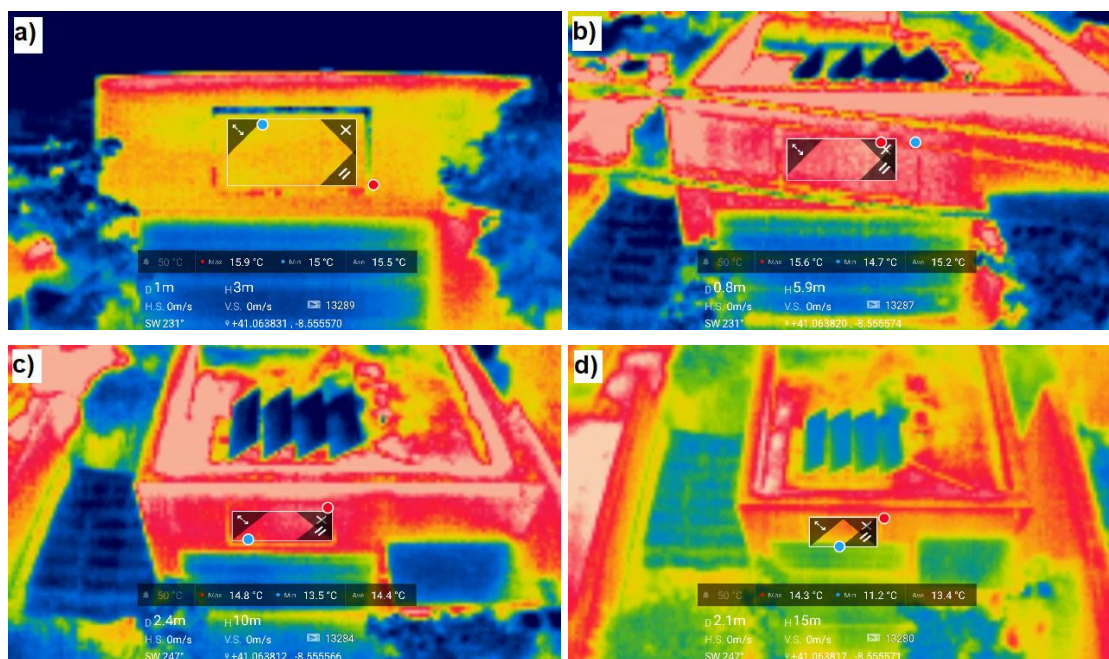


Figura 66 – Termogramas obtidos com drone para o ensaio: a) QM5; b) QM6; c) QM7; d) QM8

A Tabela 4 apresenta os valores médios da temperatura superficial da área em estudo em função da diferença de cota em relação ao solo, mantendo-se sempre o mesmo afastamento em relação à fachada. A temperatura de referência (medida com a câmara da *Fluke*) é de 16.28°C. A partir dos 10 m (QM7) é possível observar uma descida mais acentuada da temperatura lida pelo drone. Este facto poderia coincidir com o aumento da inclinação do gimbal - que poderia fazer variar a emissividade - porém, o ângulo em relação à fachada foi sempre inferior a 60° (material não metálico), afastando essa hipótese. Esta diminuição acentuada da temperatura poderá estar relacionada com a falta de sensibilidade do drone para maiores distâncias ao alvo.

Tabela 4 – Valores médios da temperatura superficial para os ensaios QM5-8 do Teste 2

	QM5	QM6	QM7	QM8
Drone	15.5°C	15.2°C	14.4°C	13.4°C
Inclinação Gimbal	-6°	-27°	-44°	-59°

A realização do teste 2 permitiu perceber que, apesar dos termogramas do drone terem uma dimensão de 640x360 pixels, o que define a qualidade da imagem é o sensor da câmara infravermelha, que tem uma resolução de 160x120 pixels, muito inferior à da câmara da *Fluke*, condicionando assim a qualidade da imagem. A sensibilidade da câmara do drone não é indicada pela *DJI*. Porém, através das medições executadas nos ensaios QM1, QM2, QM3 e QM4 verifica-se que é da ordem das décimas, ao contrário da câmara da *Fluke*, que é da ordem das centésimas, não sendo o drone capaz de detetar pequenas diferenças de temperatura.

Este teste comprova também a importância da distância do sensor ao objeto a medir. No ensaio QM4 (15 m de afastamento), QM7 (10 m de altura) e QM8 (15 m de altura) verifica-se uma variação acentuada nas temperaturas lidas, havendo sempre uma diferença maior para as medições dos ensaios anteriores. Isto verifica-se para ambos os equipamentos, pelo que não é uma condicionante exclusiva do drone, mas

sim, devida à presença da atmosfera que perturba a medição. Estas perturbações podem e devem ser posteriormente corrigidas, pois muitas vezes devido às dimensões dos edifícios, obstáculos presentes na envolvente e às características do voo não é possível voar a distâncias iguais ou inferiores a 10 m das fachadas.

5.3. TESTE 3

Após a realização dos vários voos para recolher termogramas das duas fachadas do edifício do caso de estudo, com o recurso ao *Colmap* criou-se um modelo 3D para cada ensaio efetuado no teste 3. Através do *MeshLab* é possível obter o número de vértices gerados para cada um dos modelos. Este número de vértices representam os pontos que o *Colmap* consegue identificar em comum nos termogramas e gerar para criar o modelo 3D. Para cada ensaio definido no capítulo 3 para o Teste 3, são apresentadas as figuras dos modelos 3D e o número de vértices correspondentes.

Os ensaios C1, C2 e C3 (Figura 67) demonstraram que dias nublados (C2) têm grande impacto nas medições térmicas, pois obteve-se menos de metade dos vértices para um levantamento em relação a um dia de céu limpo (C1 e C3). O número de vértices (Tabela 5) para um dia de céu limpo (C1) e para céu limpo com vento forte (C3) é bastante aceitável para um conjunto de apenas 25 termogramas. Porém, o melhor resultado verificou-se no dia de céu limpo com vento forte (C3), com 69 466 vértices. Neste dia, no período do ensaio (durante a tarde) a velocidade do vento mais alta registada foi de 24 km/h, valor inferior a 25 km/h, que é referido na literatura como máximo para a realização de medições. Nestes resultados deve-se ter em conta que os ensaios foram realizados em alturas diferentes do dia, uma vez que o ensaio C1 e C2 foram realizados às 12 e 11 horas, respetivamente, enquanto que o ensaio C3 realizou-se às 15 horas e 30 minutos. A escolha do horário para realização dos ensaios teve em conta a temperatura média do ar durante o primeiro ensaio que foi realizado (ensaio C3, com temperatura média do ar de 13.1°C) e que se pretendeu manter aproximadamente nos ensaios C1 e C2. Porém, este pressuposto de manter a temperatura média do ar semelhante nos ensaios C1 a C3 poderá ter condicionado os resultados obtidos neste grupo de ensaios, uma vez que o momento do dia em que se realizam os ensaios condiciona os resultados, como se pode verificar nos ensaios C4 a C8. Portanto, o facto de C3 ter dado o melhor resultado, poderá não estar relacionado com a existência de vento forte, mas com o momento do dia em que se captam as imagens. Apesar desta conclusão para o levantamento final, foi escolhido o melhor resultado obtido nesta análise, isto é, céu limpo com vento forte.

Tabela 5 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência das condições climáticas

Condições Climáticas		
C1	C2	C3
50 912	22 820	69 466



Figura 67 – Nuvem de pontos gerada para: a) céu limpo (C1); b) céu nublado (C2); c) vento forte (C3)

De forma a garantir as condições climáticas o mais parecidas possível (céu limpo), os ensaios C4, C5, C6, C7 e C8 (Figura 69) foram realizados no dia 7 de maio a partir das 16 horas e no dia 8 de maio até às 12 horas. Para um levantamento termográfico, períodos com radiação solar baixa ou nula (C5, C6 e C7) não permitem obter uma reconstrução tridimensional definida, pois obteve-se um número reduzido de vértices (Tabela 6) e uma reconstrução com pontos muito dispersos. Entre o ensaio C4 (16 horas) e C8 (12 horas) a diferença de vértices gerados é também significativa - 28 203 vértices. Este facto pode ser explicado através da análise dos termogramas captados durante o voo (Figura 68). No ensaio C4 tem-se mais áreas com cores mais claras e vivas (temperaturas altas) enquanto que no ensaio C8 tem-se mais áreas uniformes com cores mais escuras (zonas frias) o que dificulta a tarefa da reconstrução pelo método SfM. Ou seja, além da necessidade de haver radiação solar (após o nascer do sol e antes do pôr do sol) é também importante que o edifício se encontre por um longo período de tempo sob o efeito da radiação solar, para que haja diferenças de temperaturas significativas, que originem um contraste térmico mais evidente e que facilite o reconhecimento de pontos homólogos. Estas foram, por isso, as condições consideradas para o levantamento final.

Tabela 6 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da radiação solar

Radiação Solar				
C4	C5	C6	C7	C8
71 259	28 243	16 067	19 364	43 056

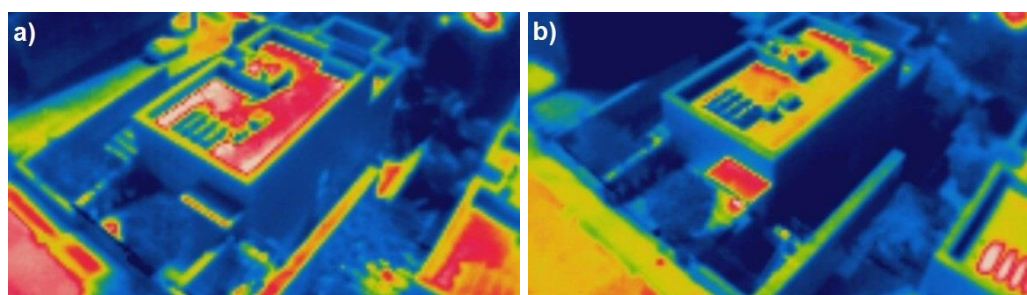


Figura 68 – Termograma captado para as: a) 16 horas (C4); b) 12 horas (C8)

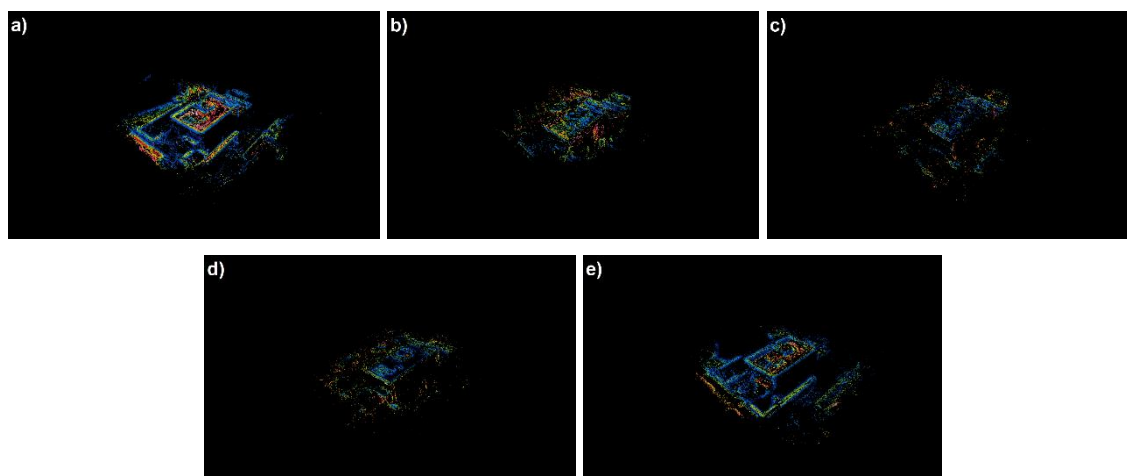


Figura 69 – Nuvem de pontos gerada para as: a) 16 horas (C4); b) 20 horas (C5); c) 23 horas e 30 minutos (C6); d) 7 horas (C7); e) 12 horas (C8)

Os ensaios C9, C10, C11, C12 e C13 (Figura 70), para análise da paleta de cores, realizaram-se com condições meteorológicas semelhantes. Os melhores resultados (Tabela 7) são obtidos com a paleta “Rainbow” (C9) e “HotMetal” (C12). Apesar de a paleta “HotMetal” apresentar mais 1 159 vértices que a paleta “Rainbow”, o modelo obtido com esta última possui mais vértices para definir as fachadas que são mais relevantes para definir a forma do edifício. Por este motivo e porque a diferença entre o número de vértices nos dois modelos é pequena, a paleta escolhida para o levantamento final foi a “Rainbow”.

Tabela 7 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da paleta de cores

Paleta de Cores				
C9	C10	C11	C12	C13
69 466	49 487	57 104	70 625	66 414

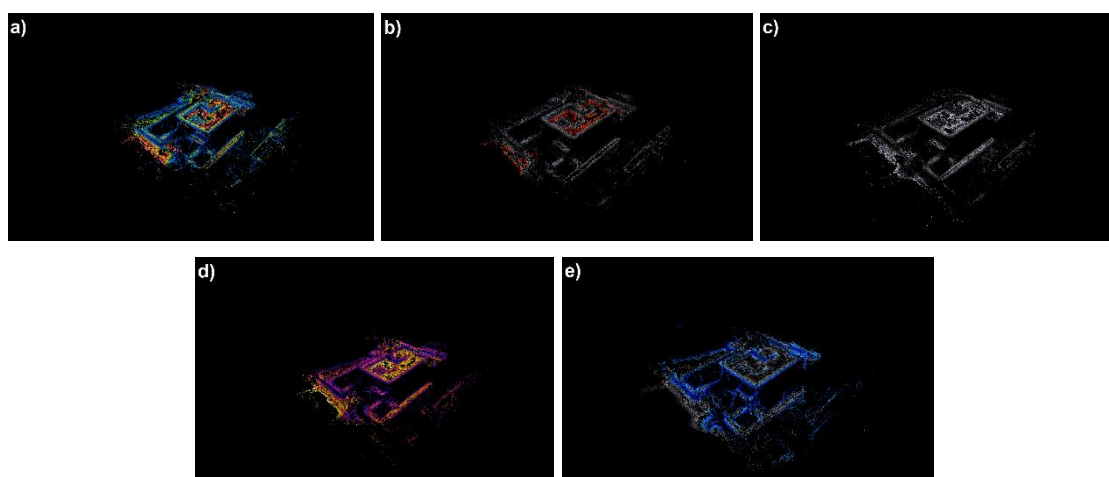


Figura 70 – Nuvem de pontos gerada para a paleta de cor: a) “Rainbow” (C9); b) “HotSpot” (C10); c) “Gray” (C11); d) “HotMetal” (C12); e) “ColdSpot” (C13)

O aumento da sobreposição das imagens tem como consequência o aumento da duração do voo, do número de termogramas captados e, conseqüentemente do número de vértices obtidos no modelo 3D. A sobreposição deve ser conjugada com a duração da bateria do controlo remoto, das baterias do drone e do número de baterias disponíveis para a execução do trabalho de forma contínua. Sempre que possível, deve-se optar por uma sobreposição de no mínimo 90% (C16), que se traduziu num modelo com 289 711 vértices (Tabela 8). Uma sobreposição de 80% (C15) traduziu-se num modelo com 101 414 vértices e uma sobreposição de 70% (C14) em 29 294 vértices (Tabela 8). Os três ensaios (Figura 71) realizaram-se no mesmo dia durante o período da tarde com céu limpo.

Tabela 8 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da sobreposição de imagens

Sobreposição		
C14	C15	C16
29 294	101 414	289 711

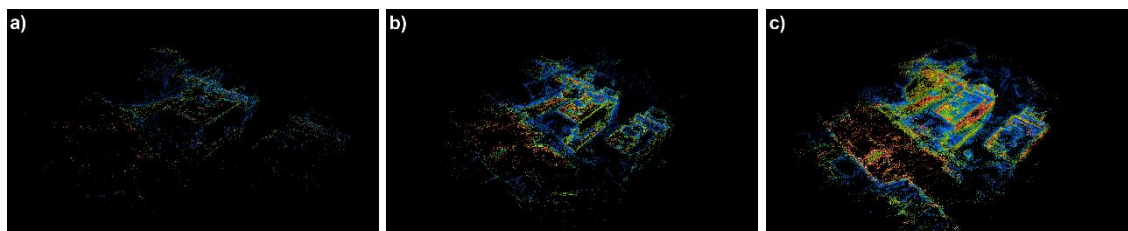


Figura 71 – Nuvem de pontos gerada para sobreposição de: a) 70% (C14); b) 80% (C15); c) 90% (C16)

A realização dos ensaios C17, C18 e C19 (Figura 72) ocorreu durante o período da tarde do mesmo dia com céu limpo. O melhor resultado verifica-se para o ensaio C17 (70°) com 768 254 vértices (Tabela 9), com uma diferença de 9 526 vértices para o ensaio C18 (55°) e de 380 193 vértices para o ensaio C19 (40°). Para estes ensaios, como as nuvens de pontos geradas possuem elevado número de vértices, foi possível gerar a malha do modelo 3D. Apesar da diferença de vértices para o ensaio C17 e C18 ser significativa, analisando a malha obtida em cada um dos ensaios (Figura 73), pode verificar-se que com 55° de inclinação obtém-se mais 1 127 926 vértices e mais 2 226 204 faces (Tabela 10) que na malha do ensaio com 70° de inclinação. Por este motivo, a inclinação a escolher para o levantamento final foi de 55°. Apesar dos ensaios C19 (40°) e C16 (45°) terem sido realizados em dias diferentes, ambos os dias rondavam os 16°C de média, céu limpo e ventos na média dos 5.5 km/h. A diferença significativa de vértices obtida, de 98 350 vértices, pode ser explicada pelo horário em que se realizaram os ensaios, tal como já referido anteriormente. Enquanto que o ensaio C19 foi realizado até às 18 horas e 45 minutos, o ensaio C16 realizou-se até às 20 horas e 20 minutos, horário este menos adequado para o levantamento termográfico.

Tabela 9 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da inclinação do gimbal

Inclinação Gimbal		
C17	C18	C19
768 254	758 728	388 061

Tabela 10 – Número de faces e vértices gerados na malha para avaliar a influência da inclinação do gimbal

	C17	C18
Vértices	594 887	1 722 813
Faces	1 137 602	3 363 806

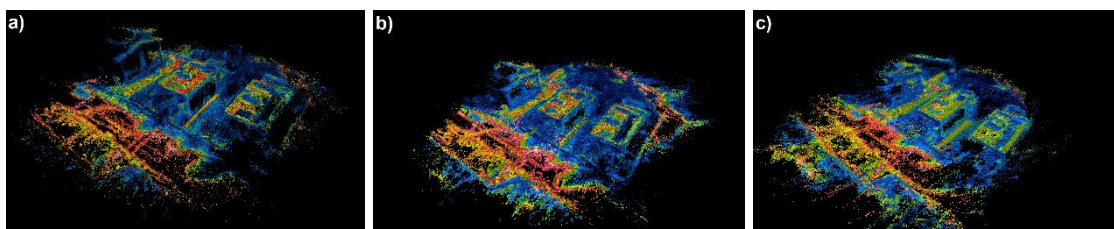


Figura 72 – Nuvem de pontos gerada para inclinação do gimbal de: a) 70° (C17); b) 55° (C18); c) 40° (C19)

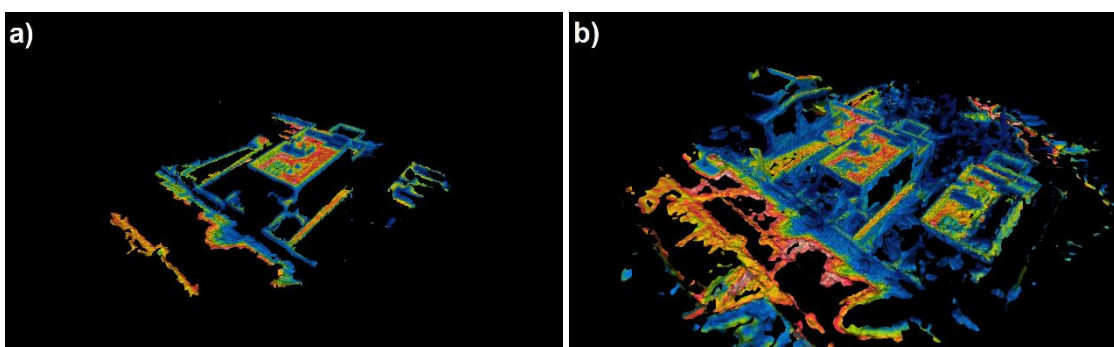


Figura 73 – Malha gerada para inclinação do gimbal de: a) 70° (C17); b) 55° (C18)

Para os dois voos à mesma altura, realizados no mesmo dia durante o período do fim da tarde com céu limpo e vento forte, mas com trajetórias diferentes (C20 e C21), verificou-se uma diferença bastante significativa (Figura 74). Para a trajetória oblíqua (C20) o modelo 3D possui 200 751 vértices e para a trajetória elíptica (C21) 103 829 vértices (Tabela 11), pelo que a trajetória oblíqua é a mais indicada. A diferença de pontos obtida pode dever-se ao número de termogramas captados e à distância do drone ao edifício. Enquanto que o drone na trajetória elíptica apenas anda em torno do edifício a uma grande distância, na trajetória oblíqua aproxima-se e afasta-se do edifício. Quanto mais perto do edifício, melhor os termogramas traduzem os elementos da fachada e mais pormenores vão ser possíveis de reconhecer na reconstrução tridimensional. Este facto, conjugado com o maior número de termogramas captados com a trajetória oblíqua (mais 53), faz com que estejam reunidas melhores condições para a aplicação do método SfM.

Tabela 11 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da rota de voo

Rota de Voo	
C20	C21
200 751	103 829

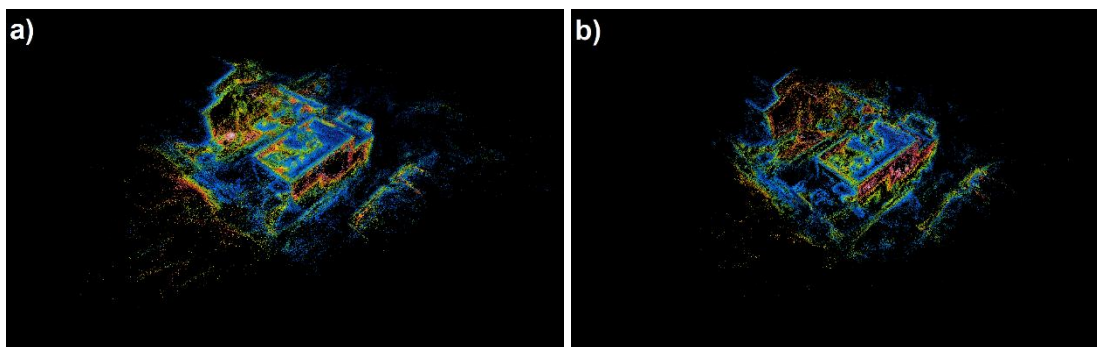


Figura 74 – Nuvem de pontos gerada para uma rota: a) oblíqua (C20); b) elíptica (C21)

Os ensaios para analisar a influência da fusão do visível com os infravermelhos (C22 a C24) ocorreram no mesmo dia, com vento forte e céu limpo, durante a tarde, num período de 20 minutos (após 1 hora do ensaio C3), garantindo assim condições meteorológicas semelhantes. Ao usar-se a tecnologia MSX da *DJI*, quanto maior a incorporação da imagem RGB nos termogramas (C22) melhor foi o resultado obtido (Figura 75). Uma incorporação residual do visível (C24), em que apenas surgem linhas brancas para dar a forma dos elementos, fez com que o modelo obtido acabasse por gerar menos 29 742 vértices do que a usar só a imagem térmica (C3). A diferença mais significativa verificou-se com 2/3 do visível (C22), em que se obtiveram 96 809 vértices (Tabela 12), mais 27 343 vértices que no ensaio C3.

Tabela 12 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência da fusão do visível com os infravermelhos

Fusão de RGB com IF		
C22	C23	C24
96 809	71 673	39 724

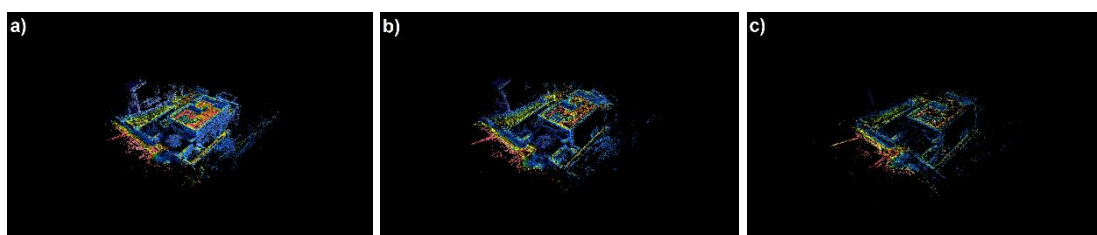


Figura 75 – Nuvem de pontos gerada para gama de RGB: a) a 2/3 (C22); b) a 1/3 (C23); c) no mínimo (C24)

Por último, a realização dos ensaios com escala de temperaturas fixas (C25 a C27) ocorreu no mesmo dia, com céu limpo, num período de 30 minutos, após o ensaio C1. Estes ensaios permitem obter conclusões semelhantes aos da avaliação do efeito da radiação solar. A presença de grandes áreas uniformes, sem grande contraste térmico, faz com que seja mais difícil efetuar o reconhecimento de pontos homólogos, que é precisamente o que acontece com os ensaios C26 e C27 (Figura 76). Ao escolher intervalos de temperatura demasiado estreitos e desajustados às temperaturas superficiais a medir, perde-se informação. No ensaio C25 (Figura 76), a gama de temperaturas da escala englobava todas as temperaturas superficiais do edifício, dando assim origem a termogramas com maior contraste térmico, evidenciados por uma gama mais rica de cores. O resultado obtido para este ensaio foi de 61 624

vértices (Tabela 13), mais 36 245 vértices que o ensaio C26, mais 15 048 vértices que o ensaio C27 e mais 10 712 vértices que o mesmo ensaio, mas com escala de temperatura automática (C1). A utilização uma escala de temperaturas fixa permite que nos termogramas não ocorram variações de cor para a mesma área, que resultam da movimentação do drone, o que facilita a criação de pontos homólogos e garante a própria coerência do modelo.

Tabela 13 – Número de vértices gerados na nuvem de pontos para avaliar a influência do uso de escala de temperatura fixa

Escala de Temperatura Fixa		
C25	C26	C27
61 624	25 379	46 576



Figura 76 – Nuvem de pontos gerada para escala de temperatura fixa de: a) 5°C a 38°C (C25); b) 0°C a 24°C (C26); c) -10°C a 30°C (C27)

5.4. LEVANTAMENTO FINAL

Após a realização da análise de sensibilidade aos vários fatores que podem condicionar um levantamento termográfico com um drone, procedeu-se ao levantamento final de todo o edifício. O levantamento final ocorreu no dia 28 de maio, pelas 16 horas, com céu limpo, uma temperatura média do ar de 16.8°C e velocidade do vento de 12.9 km/h, em média, e rajadas máximas na ordem dos 22.5 km/h (Figura 77).

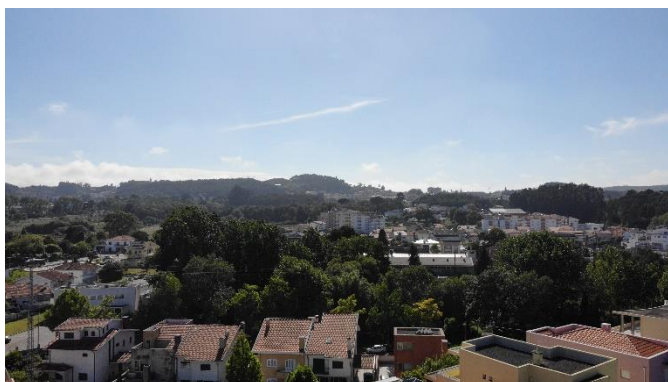


Figura 77 – Condição meteorológica para o levantamento final

Todo o voo foi planeado através da aplicação da *DJI Pilot*, em modo oblíquo. Ao todo, a área selecionada para o levantamento é de 207 m² e encontra-se representada na Figura 78. O ângulo de curso escolhido foi de 55° e a margem em relação aos limites da área selecionada de 7 m. Para uma sobreposição de 90%, são gerados 5 trajetos. O trajeto 1 (Figura 78) corresponde a um levantamento de mapeamento,

com o gimbal a 90° (perpendicular à normal do edifício) e os restantes 4 trajetos (Figura 79) para cada uma das fachadas. Este primeiro trajeto não é necessário para o objetivo desta dissertação, porém considerou-se oportuno realizá-lo apenas para contabilização do tempo necessário para captação de toda a informação do edifício com o drone. Antes de se iniciar a operação, mediu-se a temperatura máxima e mínima (Figura 80) com o drone para se definir a gama da escala de temperaturas, tendo-se utilizado um intervalo de 12°C a 45°C. O voo efetuou-se sempre a 1 m/s e a 26 m de altura (em relação à rua do edifício em estudo) para se garantir uma distância de segurança de 5 m para o obstáculo mais alto na área de voo.

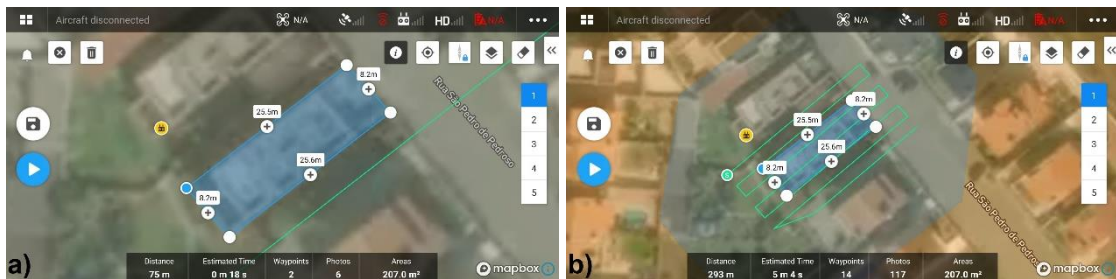


Figura 78 – Modo oblíquo: a) área selecionada para o levantamento; b) trajeto para mapeamento

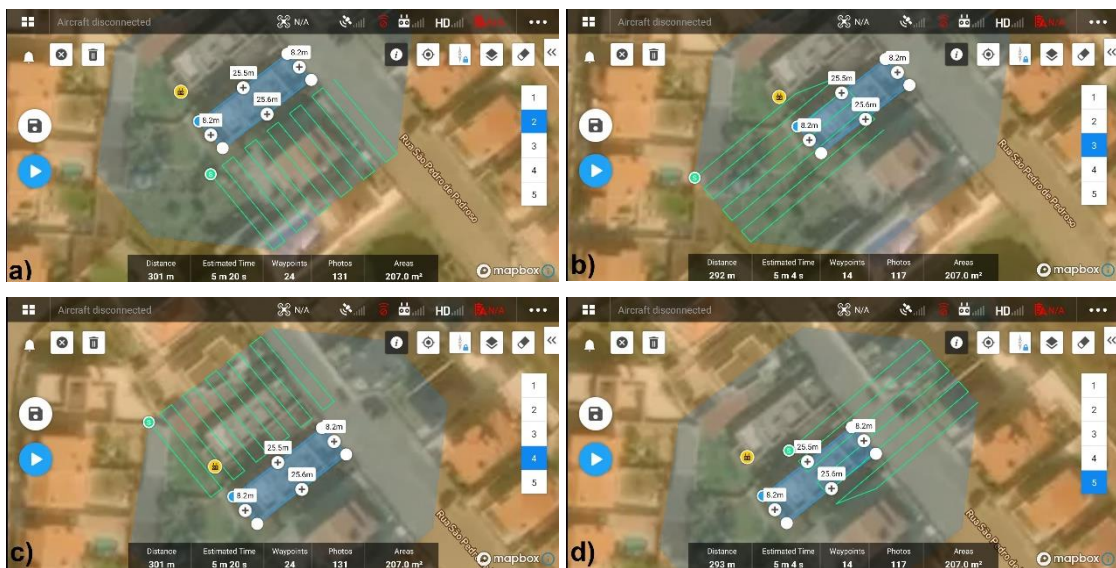


Figura 79 – Trajeto oblíquo para a fachada a: a) sudeste; b) sudoeste; c) noroeste; d) nordeste



Figura 80 – Medição da temperatura máxima e mínima com o drone

Como alguns drones podem não possuir a tecnologia de fusão com o infravermelho ou apenas possuir câmara térmica, foi inicialmente realizado o voo apenas com infravermelho. A operação demorou 39 minutos e 50 segundos. Esta incluiu levantar voo, medição da temperatura máxima e mínima do edifício para fixação da escala de temperaturas, a realização dos 5 trajetos e aterrar. Ao todo, nestas operações usou-se 32% da bateria do controlo remoto, a totalidade de uma bateria do drone e 44% da segunda. Na reconstrução tridimensional, usaram-se os 437 termogramas obtidos pelo drone ao efetuar os trajetos 2, 3, 4 e 5. Foram necessários 39 minutos e 52 segundos para gerar o modelo 3D (Figura 81).

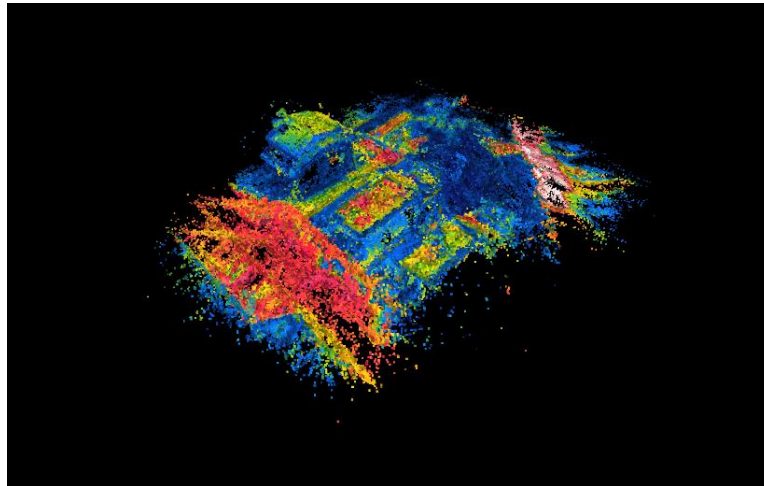


Figura 81 – Nuvem de pontos final com infravermelhos

Como o equipamento utilizado neste trabalho permite a fusão da imagem visível com a infravermelha, foi efetuado um levantamento para avaliar a sua eficácia face ao levantamento apenas com as imagens térmicas. Realizou-se exatamente o mesmo voo efetuado para o infravermelho, mas com o modo MSX ativado a 2/3. A operação demorou 37 minutos e 41 segundos e usou-se 30% da bateria do controlo remoto, uma bateria do drone completa e uma segunda bateria com 56% de carga. Na reconstrução tridimensional, usaram-se os 441 termogramas obtidos pelo drone ao efetuar os trajetos 2, 3, 4 e 5. Foram necessários 56 minutos e 4 segundos para gerar o modelo 3D (Figura 82).

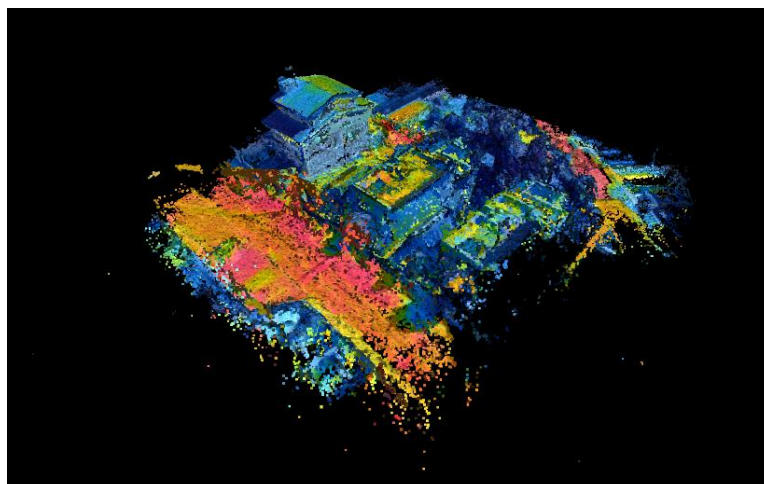


Figura 82 – Nuvem de pontos final com MSX

Por último, como o drone capta imagens visíveis ao mesmo tempo que imagens térmicas, também se utilizaram 437 fotografias do primeiro levantamento para criar um modelo 3D visível. O modelo 3D foi gerado em 6 horas e 19 minutos e apenas se conseguiu gerar a nuvem de pontos (Figura 83).

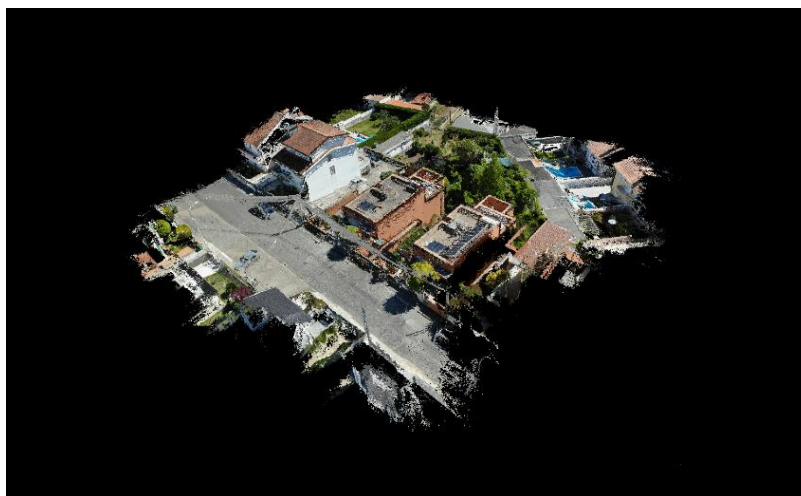


Figura 83 – Nuvem de pontos final com RGB

Os resultados obtidos para os dois modelos 3D termográficos é muito satisfatório, principalmente para o levantamento com MSX. Para ambos os levantamentos obteve-se uma nuvem de pontos densa, na qual a forma do edifício é facilmente reconhecida e os padrões térmicos também. A ausência de vértices ou o ruído existente é mais comum em áreas de temperatura uniforme e nas áreas localizadas na base do edifício, pois estas encontram-se a uma maior distância do drone. Isto também se verifica em áreas próximas de obstáculos como árvores. Uma vez que a resolução de 160x120 é das mais baixas do mercado, uma resolução superior do sensor infravermelho permitiria obter um modelo mais limpo e definido. Para o levantamento infravermelho obtiveram-se 1 200 895 vértices e 2 005 391 vértices para o levantamento com MSX. Apesar da reconstrução tridimensional do modelo com MSX ter demorado mais 16 minutos e 12 segundos, tem-se uma diferença de mais 804 496 vértices. Esta diferença vai-se traduzir numa malha mais definida e aproximada da realidade. Ambas as nuvens de pontos apresentam pontos dispersos, pelo que uma limpeza destes se traduziria num modelo 3D mais adequado. Porém, como o objetivo desta dissertação era avaliar a possibilidade de criar modelos 3D térmicos, apenas se suavizaram as texturas da malha gerada pelo *Colmap*. As malhas finais são apresentadas nas Figuras 84, 85, 86 e 87 e é através destas que se percebe que o modelo obtido com MSX é bastante preciso, enquanto que só com infravermelho ocorre muito ruído. Isto distorce o resultado final, algo que poderá ser melhorado através de uma limpeza da nuvem de pontos ou com um sensor de maior resolução. A reconstrução RGB gerou ao todo 11 573 813 vértices, porém o grande tamanho das imagens RGB tem um impacto enorme no tempo da reconstrução, levando a uma diferença de 5 horas e 23 minutos a mais e sem se conseguir gerar a malha, em relação à reconstrução com MSX.

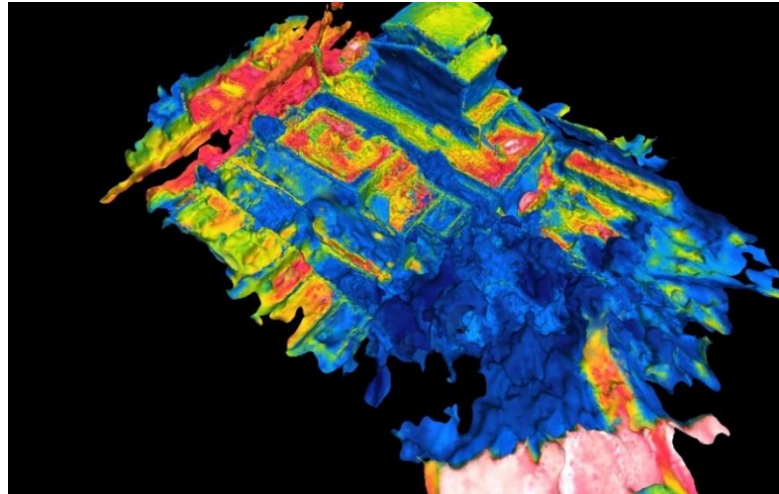


Figura 84 – Malha final com infravermelho das fachadas a sudoeste e a noroeste

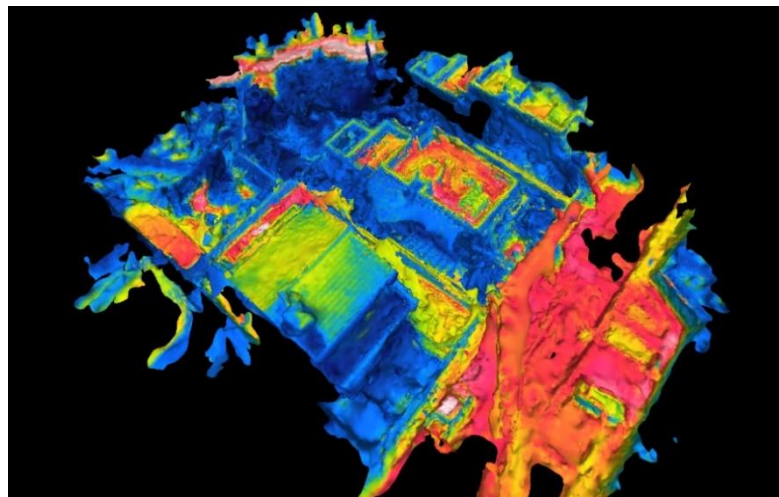


Figura 85 – Malha final com infravermelho das fachadas a sudeste e a nordeste

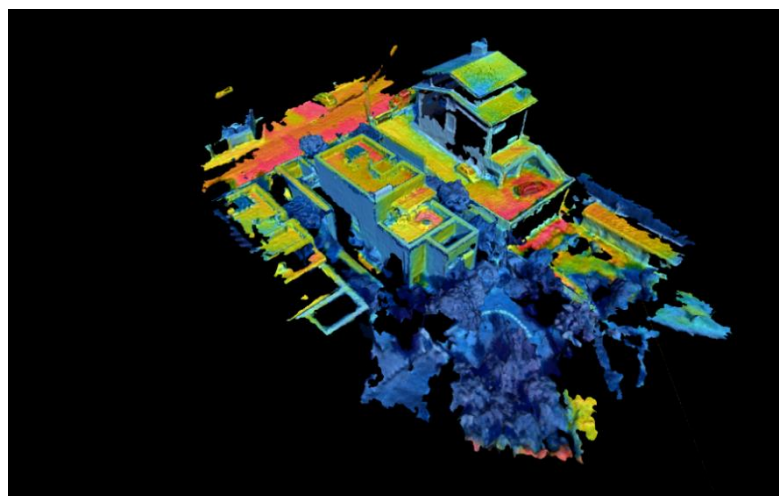


Figura 86 – Malha final com MSX das fachadas a sudoeste e a noroeste

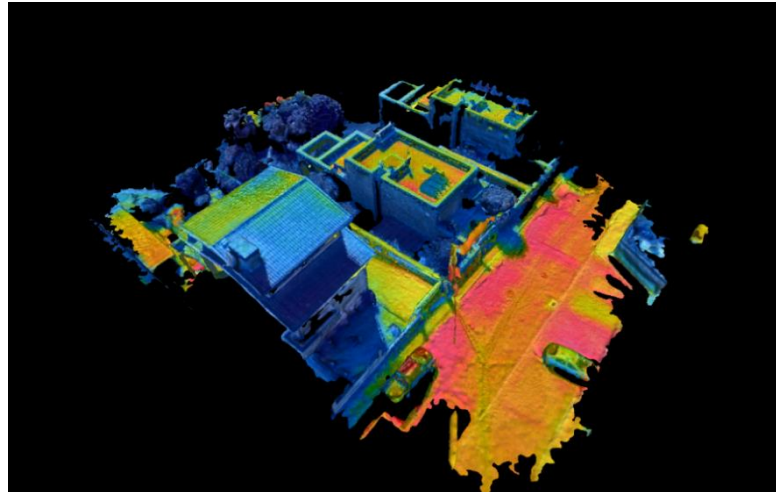


Figura 87 – Malha final com MSX das fachadas a sudeste e a nordeste

5.5. METODOLOGIA PARA EFETUAR UM LEVANTAMENTO TERMOGRÁFICO COM DRONES

De acordo com os resultados obtidos nos dois levantamentos finais, sugere-se o seguinte método para executar um levantamento termográfico com um drone:

- Cumprir com as regras da legislação de drones, cumprindo com as regras de voo e respetiva categoria e subcategoria de operação;
- Criar um mapa de alturas máximas dos obstáculos da área de voo pretendida;
- Efetuar o pedido à AAN de acordo com as necessidades para efetuar o levantamento;
- Selecionar através da aplicação móvel do drone a área a levantar pelo modo oblíquo que define automaticamente a trajetória oblíqua;
- Mínimo de sobreposição de 90%;
- Ângulo de inclinação do gimbal de 55°;
- Altura do levantamento de acordo com a altura do edifício e dos obstáculos na área de voo;
- Efetuar o levantamento em dias de céu limpo, da parte da tarde e antes do pôr do sol;
- Paleta de cores equivalente à “Rainbow” ou à “HotMetal” do *DJI Mavic 2 Enterprise Dual*;
- Se o equipamento possuir uma tecnologia de fusão de visível com infravermelho, ativar o respetivo modo e optar no mínimo por 2/3 de visível no termograma.
- Medir a temperatura máxima e mínima do edifício a levantar e definir o intervalo de temperaturas da escala;
- Ajustar a emissividade se possível;
- Efetuar a operação.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

O uso de drones para realização de trabalhos de mapeamento, levantamentos, gestão de obras e inspeção de edifícios é bastante útil pela eficácia, rapidez e segurança que trazem às operações, pelo que já podemos encontrar a sua utilização no setor da construção civil. A evolução tecnológica permite, nos dias de hoje, o uso das câmaras térmicas mais correntes em compatibilidade com os drones, sendo a termografia uma técnica extremamente valiosa para análise e compreensão do comportamento térmico dos edifícios. A metodologia SfM é um método viável, eficaz, rápido e de baixo custo que permite obter um modelo 3D de um edifício, pelo que a sua conjugação com o uso de drones permite a reconstrução tridimensional de todas as áreas de um edifício, incluindo as inacessíveis. Estes modelos são essenciais para se poder reconstituir o estado atual de um edifício, possibilitando a atualização ou a criação dos modelos BIM. Apesar das inúmeras vantagens, os drones são aeronaves que para voar estão dependentes das boas condições meteorológicas. A autonomia das baterias dos drones é neste momento reduzida, pelo que a sua melhoria fará com que seja possível levantar grandes edifícios sem a necessidade constante de trocar a bateria e de possuir um número elevado destas (mais custos).

Com base na metodologia desenvolvida e nos resultados obtidos é possível concluir que:

- Devido à nova legislação que entrou em vigor a partir do dia 31 de dezembro de 2020, os voos com drones estão sujeitos a normas e regras que necessitam de ser cumpridas para evitar danos e acidentes graves. A leitura do Regulamento de Execução (UE) 2019/947 da Comissão, do Regulamento Delegado (UE) 2019/945 da Comissão, do Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, o Decreto-Lei n.º 58/2018 e a Portaria n.º 2/2021 são documentos imprescindíveis para o conhecimento e a correta utilização dos drones;
- O drone *DJI Mavic 2 Enterprise Dual* apesar de acessível (preço relativamente baixo) e de possuir uma câmara infravermelha radiométrica, não é capaz de exportar para os termogramas captados as temperaturas lidas em tempo real. Modelo este que veio a ser substituído pelo *DJI Mavic 2 Enterprise Advanced* e que corrige a falha do mesmo;
- O drone em uso, apesar da excelente câmara RGB, não é adequado para leituras térmicas. Este não permite o ajuste da emissividade, que não é indicada pelo fabricante nem deduzível pelo teste em que usou a câmara da *Fluke TSI60+* para se poder comparar os resultados obtidos pelo drone em diferentes materiais. A emissividade do drone ou é sempre a mesma, independentemente da superfície em estudo ou as leituras carecem de uma precisão mais elevada, dado este também não fornecido pelo fabricante;
- Os termogramas obtidos pelo drone, apesar de serem exibidos numa resolução de 640x360 pixels, possuem uma qualidade inferior às da câmara da *Fluke*, que possui uma resolução de

320x240 pixels. A qualidade de uma imagem é definida pela resolução do sensor, que no drone é de 160x120 e na câmara da *Fluke 320x240*;

- É possível gerar modelos 3D térmicos de uma forma segura e eficiente;
- Os levantamentos termográficos com drones, muitas vezes não se podem realizar a 10 m de distância do alvo devido aos obstáculos existentes. Para distâncias superiores a 10 m, as leituras das temperaturas são muitas vezes perturbadas pela atmosfera, pelo que devem ser posteriormente corrigidas;
- Os parâmetros ideais para realizar eficazmente um levantamento termográfico são:
 1. Sobreposição maior ou igual a 90%;
 2. Ângulo de inclinação a 55°;
 3. Efetuar os levantamentos em dias de céu limpo com ou sem vento, da parte da tarde e antes do pôr do sol;
 4. Usar uma paleta de cores equivalente à “Rainbow” ou à “HotMetal” do *DJI Mavic 2 Enterprise Dual*;
 5. Se possível usar a tecnologia de fusão de visível com infravermelho, com o mínimo de 2/3 de visível no termograma;
 6. Usar uma escala de temperatura fixa adequada ao edifício.
- Como os termogramas possuem ainda uma qualidade de imagem inferior às imagens digitais devido à baixa resolução, a reconstrução tridimensional através do método SfM é bastante mais rápida.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com este trabalho foi possível entender que a criação de modelos térmicos é possível de uma forma rápida e eficaz com os equipamentos certos. Sugere-se assim que para trabalhos futuros:

- Se teste a metodologia noutros edifícios, com acabamentos e formatos diferentes;
- Se utilize um drone com um sensor de maior resolução para potencialmente se obterem melhores resultados na reconstrução tridimensional;
- Se use um drone capaz de exportar as temperaturas para pós processamento. Os modelos tridimensionais térmicos terão significado e mais valor se permitirem analisar as temperaturas captadas e inseridas em cada pixel dos termogramas. Será de interesse a criação de um modelo BIM que guarde, mostre e permita a análise das temperaturas;
- Se utilize um drone para estudo de pontes térmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Azhar, S., M. Khalfan, and T. Maqsood, *Building information modelling (BIM): now and beyond*. Construction Economics and Building, 2012. **12**(4): p. 15-28.
- [2] Venâncio, M.J.L., *Avaliação da Implementação de BIM-Building Information Modeling em Portugal*. 2015. Dissertação de Mestrado.
- [3] Volk, R., J. Stengel, and F. Schultmann, *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs*. Automation in construction, 2014. **38**: p. 109-127.
- [4] Miettinen, R. and S. Paavola, *Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling*. Automation in construction, 2014. **43**: p. 84-91.
- [5] Fridrich, J. and K. Kubečka, *BIM—the process of modern civil engineering in higher education*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014. **141**: p. 763-767.
- [6] Azhar, S., *Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry*. Leadership and management in engineering, 2011. **11**(3): p. 241-252.
- [7] <https://utilizandobim.com/blog/bim-8d-seguranca/>. Março 2021.
- [8] Sacks, R. and R. Barak, *Teaching building information modeling as an integral part of freshman year civil engineering education*. Journal of professional issues in engineering education and practice, 2010. **136**(1): p. 30-38.
- [9] Pereira, V.F.F., *Utilização de ferramentas BIM na avaliação da eficiência energética: possibilidades e desafios*. 2020.
- [10] Baqersad, J., et al., *Photogrammetry and optical methods in structural dynamics—a review*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017. **86**: p. 17-34.
- [11] Groetelaars, N.J., *Criação de modelos BIM a partir de "nuvens de pontos": estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica*. 2015. Dissertação de Pós-Graduação.
- [12] Tang, P., et al., *Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques*. Automation in construction, 2010. **19**(7): p. 829-843.
- [13] Jiang, R., D.V. Jáuregui, and K.R. White, *Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review*. Measurement, 2008. **41**(8): p. 823-834.
- [14] Linder, W., *Digital photogrammetry*. Vol. 1. 2009: Springer.
- [15] Shashi, M. and K. Jain, *Use of photogrammetry in 3D modeling and visualization of buildings*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2007. **2**(2): p. 37-40.
- [16] Sánchez, J. and E. Quirós, *Semiautomatic detection and classification of materials in historic buildings with low-cost photogrammetric equipment*. Journal of Cultural Heritage, 2017. **25**: p. 21-30.
- [17] Ma, Z. and S. Liu, *A review of 3D reconstruction techniques in civil engineering and their applications*. Advanced Engineering Informatics, 2018. **37**: p. 163-174.
- [18] Westoby, M.J., et al., *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. Geomorphology, 2012. **179**: p. 300-314.

- [19] 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, Springer. p. 91-117.
- [20] Altoé, L. and D. Oliveira Filho, *Termografia infravermelha aplicada à inspeção de edifícios*. Acta Tecnológica, 2012. **7**(1): p. 55-59.
- [21] Mendonça, L.V., *Termografia por Infravermelhos Inspeção de Betão*. Revista Engenharia & Vida, Lisboa, 2005. **1**(16): p. 53-57.
- [22] Astarita, T., et al., *A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements*. Optics & Laser Technology, 2000. **32**(7-8): p. 593-610.
- [23] Plesu, R., G. Teodoriu, and G. Taranu, *Infrared thermography applications for building investigation*. Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura, 2012. **58**(1): p. 157.
- [24] Barreira, E.S.B.M., *Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios*. 2004. Dissertação de Mestrado.
- [25] Melrinho, A., L. Matias, and P. Faria, *Detecção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço através da termografia de infravermelhos*. Tech ITT, 2015. **13**(37): p. 29-38.
- [26] Dias, J.M.C., *Retrospectiva e perspectivas futuras da utilização da termografia na inspeção de edifícios*. 2020. Dissertação de Mestrado.
- [27] 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.
- [28] Shariq, M.H. and B.R. Hughes, *Revolutionising building inspection techniques to meet large-scale energy demands: A review of the state-of-the-art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. **130**: p. 109979.
- [29] 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.
- [30] Tkac, M., et al. *Aerial Photogrammetry and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Like a Smart Technology for Digital As-Built Mapping of Existing Buildings*. in *4th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems*. 2020. Springer.
- [31] Li, Y. and C. Liu, *Applications of multirotor drone technologies in construction management*. International Journal of Construction Management, 2019. **19**(5): p. 401-412.
- [32] Omar, T. and M.L. Nehdi, *Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography*. Automation in Construction, 2017. **83**: p. 360-371.
- [33] Da Silva, W.P.A., et al., *Inspeção de manifestações patológicas em edifícios utilizando câmara termográfica integrada ao Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT): uma pesquisa documental*. Revista ALCONPAT, 2021. **11**(1): p. 123-139.
- [34] Anwar, N., M.A. Izhar, and F.A. Najam. *Construction monitoring and reporting using drones and unmanned aerial vehicles (UAVs)*. in *The Tenth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-10)*. 2018.

- [35] 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.
- [36] Russo, M., et al., *Modeling and deterioration mapping of façades in historical urban context by close-range ultra-lightweight UAVs photogrammetry*. International Journal of Architectural Heritage, 2019. **13**(4): p. 549-568.
- [37] Zhao, X., Y. Luo, and J. He, *Analysis of the Thermal Environment in Pedestrian Space Using 3D Thermal Imaging*. Energies, 2020. **13**(14): p. 3674.
- [38] Gasparini, M., J.C. Moreno-Escribano, and A. Monterroso-Checa, *Photogrammetric Acquisitions in Diverse Archaeological Contexts Using Drones: Background of the Ager Mellariensis Project (North of Córdoba-Spain)*. Drones, 2020. **4**(3): p. 47.
- [39] Biscarini, C., et al., *UAV photogrammetry, infrared thermography and GPR for enhancing structural and material degradation evaluation of the Roman masonry bridge of Ponte Lucano in Italy*. NDT & E International, 2020. **115**: p. 102287.
- [40] Sestras, P., et al., *Feasibility assessments using unmanned aerial vehicle technology in heritage buildings: Rehabilitation-restoration, spatial analysis and tourism potential analysis*. Sensors, 2020. **20**(7): p. 2054.
- [41] Zheng, H., et al., *A Thermal Performance Detection Method for Building Envelope Based on 3D Model Generated by UAV Thermal Imagery*. Energies, 2020. **13**(24): p. 6677.
- [42] <http://www.geodrone.pt/>. Março 2021.
- [43] <http://www.apwdrone.pt/>. Março 2021.
- [44] http://dronesinnovation.com/?gclid=Cj0KCQjw9YWDBhDyARIsADt6sGY4NKadM-aEr-Q8SECVIwi6WDbODs7cJZKY8KpblPBTkwBR8nG8j_saAqP8EALw_wcB. Março 2021.
- [45] <https://droneii.com/the-drone-manufacturer-ranking-2020>. Março 2021.
- [46] <https://ch.linkedin.com/company/sensefly>. Março 2021.
- [47] <https://www.linkedin.com/company/dji>. Março 2021.
- [48] <https://www.linkedin.com/company/parrot>. Março 2021.
- [49] <https://www.dji.com/pt>. Março 2021.
- [50] <https://www.parrot.com/us>. Março 2021.
- [51] <https://www.sensefly.com/>. Março 2021.
- [52] http://www.skyphoto.pt/Regras/Regulamentacao_Drones.html. Março 2021.
- [53] <https://www.anac.pt/vPT/Generico/drones/Paginas/AeronavesCivisPilotadasRemotamente.aspx>. Março 2021.
- [54] https://www.facebook.com/pg/voanaboa/photos/?ref=page_internal. Março 2021
- [55] <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/open-category-civil-drones>. Abril 2021.
- [56] <https://www.aan.pt/subPagina-AAN-001.005.005-aeronaves-nao-tripuladas-drones>. Março 2021.

ANEXOS



MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL
 AUTORIDADE AERONÁUTICA NACIONAL
 Gabinete da Autoridade Aeronáutica Nacional
 Avenida da Força Aérea Portuguesa, n.º 1
 2614-506 Amadora

AUTORIZAÇÃO / AUTHORIZATION N.º AAN 116834/2021

<i>Espaço aéreo sob responsabilidade militar</i>			
A AAN, no exercício das suas competências previstas na alínea b), do n.º 3, do artigo 4.º da Lei n.º 28/2013, de 12 de abril, concede, nos termos e condições nela descritos, autorização para efetuar levantamentos aéreos; e, simultaneamente a Força Aérea Portuguesa, no exercício das suas competências previstas na alínea a), do n.º 2, do art.º 40.º, do Decreto Regulamentar n.º 12/2015, de 31 de julho, concede, nos mesmos termos e condições, autorização para utilização do espaço aéreo sob responsabilidade militar			
OBS: A presente autorização não dispensa o cumprimento de outros regimes jurídicos constantes de diplomas legais e regulamentares que sejam, eventualmente, aplicáveis.			
OPERADOR / OPERATOR			
Rui André Almeida e Magalhães			
PILOTO(S) REMOTO(S) / REMOTE PILOT(S)			
Rui André Almeida e Magalhães			
AERONAVE(S) NÃO TRIPULADA(S) / UNMANNED AIRCRAFT(S)			
DJI - Mavic 2 Enterprise Dual [298CH5LR0A07DC / PRT-UA-0396890969]			
FINALIDADE DO(S) VOO(S) / FLIGHT(S) PURPOSE			
Tese de Mestrado de Engenharia Civil			
TIPO DE ÁREA / AREA TYPE			
CIRCULAR / CIRCULAR			
ÁREA DE VOO AUTORIZADA			
AUTHORISED FLIGHT AREA			
Local Place	Coordenada Central Central coordinate	Raio (m) Radius (m)	Altura (m AGL) Height (m AGL)
Porto - Vila Nova de Gaia	41° 3' 49.2"N 8° 33' 20.4"W	030	030
Validade da autorização / Validity of authorization			
10 de Abril de 2021 a 31 de Maio de 2021			
Período horário / Time period: 07:00 - 23:00			
EMISSÃO			
ISSUE DATE			
2021-03-29 16:17:51			

A Autoridade Aeronáutica Nacional

General Joaquim Manuel Nunes Borrego



MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL
 AUTORIDADE AERONÁUTICA NACIONAL
 Gabinete da Autoridade Aeronáutica Nacional
 Avenida da Força Aérea Portuguesa, n.º 1
 2614-506 Amadora

AUTORIZAÇÃO / AUTHORIZATION N.º AAN 121817/2021

<i>Espaço aéreo sob responsabilidade militar</i>			
A AAN, no exercício das suas competências previstas na alínea b), do n.º 3, do artigo 4.º da Lei n.º 28/2013, de 12 de abril, concede, nos termos e condições nela descritos, autorização para efetuar levantamentos aéreos; e, simultaneamente a Força Aérea Portuguesa, no exercício das suas competências previstas na alínea a), do n.º 2, do art.º 40.º, do Decreto Regulamentar n.º 12/2015, de 31 de julho, concede, nos mesmos termos e condições, autorização para utilização do espaço aéreo sob responsabilidade militar			
OBS: A presente autorização não dispensa o cumprimento de outros regimes jurídicos constantes de diplomas legais e regulamentares que sejam, eventualmente, aplicáveis.			
OPERADOR / OPERATOR			
Rui André Almeida e Magalhães			
PILOTO(S) REMOTO(S) / REMOTE PILOT(S)			
Rui André Almeida e Magalhães			
AERONAVE(S) NÃO TRIPULADA(S) / UNMANNED AIRCRAFT(S)			
DJI - Mavic 2 Enterprise Dual [298CH5LR0A07DC / PRT-UA-0396890969]			
FINALIDADE DO(S) VOO(S) / FLIGHT(S) PURPOSE			
Tese de Mestrado de Engenharia Civil			
TIPO DE ÁREA / AREA TYPE			
CIRCULAR / CIRCULAR			
ÁREA DE VOO AUTORIZADA			
AUTHORISED FLIGHT AREA			
Local Place	Coordenada Central Central coordinate	Raio (m) Radius (m)	Altura (m AGL) Height (m AGL)
Porto - Vila Nova de Gaia	41° 3' 49.2"N 8° 33' 20.4"W	050	060
Validade da autorização / Validity of authorization			
30 de Abril de 2021 a 31 de Maio de 2021			
Período horário / Time period: 07:00 - 23:58			
EMISSÃO			
ISSUE DATE			
2021-04-20 16:05:28			

A Autoridade Aeronáutica Nacional

General Joaquim Manuel Nunes Borrego

Em caso de dúvida contactar: GAAN / Levantamentos Aéreos - Telefone: +351 214 717 428 - E-mail: imagens.aereas@aan.pt