



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sandra Daniela Ferreira Fernandes

Levantamento e Diagnóstico
Estrutural com recurso a Fotogrametria

Levantamento e Diagnóstico
Estrutural com recurso a Fotogrametria

Sandra Daniela Ferreira Fernandes

UMinho | 2016

novembro de 2016



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sandra Daniela Ferreira Fernandes

Levantamento e Diagnóstico
Estrutural com recuso a Fotogrametria

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Luís F. Ramos

Co-orientação:
Professor Doutor Francisco Fernandes

AGRADECIMENTOS

O caminho percorrido ao longo destes cinco anos foi longo, mas compensador. Implicou muito trabalho, mas beneficiou de circunstâncias excecionais e oportunidades afortunadas. Assim, gostaria de, em particular, agradecer e expressar o meu profundo reconhecimento:

Ao Professor Doutor Luís F. Ramos e ao Professor Doutor Francisco Fernandes, pela orientação, por toda a disponibilidade, pelo saber que me transmitiram, pelas opiniões e críticas, pela total colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo da realização desta dissertação e por todas as palavras de incentivo.

Aos meus pais, Maria e Adelino, por todas as condições que me proporcionaram para a minha formação como pessoa e como profissional e por me apoiarem incondicionalmente em todas as decisões que tomei ao longo da vida.

Ao meu grupo de amigas, por todos os momentos partilhados nestes curtos anos de vivências e de espírito académico, pelas noites mal dormidas, pelas horas de estudo, pela diversão, pelo companheirismo e pela amizade que jamais deixará de existir.

Ao meu fiel grupo de amigos de longa data pelo contínuo incentivo e compreensão nos momentos mais difíceis deste percurso. Por todas as celebrações de conquistas ao longo destes anos. O que importa não é o que temos na vida, mas quem temos na vida e sem dúvida que eu tenho os melhores.

Ao Bruno, por me apoiar nos bons e nos maus momentos, por todo o carinho e amor, um agradecimento especial pela pessoa que és e sempre foste comigo.

À minha querida amiga Célia pela amizade, paciência, conselhos e revisão dos aspetos teóricos na dissertação.

A toda a equipa de docentes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho por toda a disponibilidade e acompanhamento prestado ao longo destes cinco anos académicos.

Ao Luís Lima e Pedro Martins pela colaboração na pilotagem do *drone* nos levantamentos fotográficos do Paço dos Duques, Igreja de Mancelos e Padrão do Salado.

À equipa do *Geomagic Design X*®, por me terem fornecido uma licença gratuita durante a utilização do *software* no decorrer desta dissertação e por toda a disponibilidade demonstrada.

RESUMO

O crescimento na engenharia civil atualmente passa em grande parte pela reabilitação do edificado. Para isso, surgem os meios para fazer levantamentos e diagnósticos estruturais visando alcançar de forma rápida e pormenorizada medições e análises do comportamento estrutural. Para tal, é apresentada no âmbito desta dissertação uma técnica que aponta obter estes resultados de forma simples e sustentável.

Com a divulgação da fotografia digital e os sucessivos avanços ao nível do processamento da imagem, a aplicabilidade da fotogrametria, método desenvolvido no início do século XIX, tende a estender-se para campos onde tradicionalmente não era empregue.

No âmbito desta dissertação, foram desenvolvidos os meios necessários para chegar a novas aplicações para a fotogrametria. Por meio de processamentos de dados massivos, equipamentos e ferramentas computacionais, foram obtidas diferentes aplicações onde a fotogrametria pode ser utilizada como um recurso muito prático.

Através de diferentes casos de estudo irá perceber-se que existem várias características do qual a fotogrametria se orgulha, no entanto também existem aspetos a melhorar ainda de forma a obter resultados melhores e extinguir as limitações que esta técnica apresenta.

A fotogrametria demonstra ser uma técnica com potencialidades que a torna uma mais-valia no campo da engenharia reversa.

Palavras-Chave: Engenharia reversa, fotogrametria, processamento de imagem, modelação, interoperabilidade

ABSTRACT

Nowadays, growth in civil engineering happens largely through rehabilitation of buildings. With this concept in mind, the resources to do surveys and structural diagnostics appear aiming to achieve a quick and detailed measurement and analysis of structural behaviour. Thus, a technique that aims to obtain these results simply and sustainably is presented in this work.

With digital photography disclosure and the successive advances in terms of image processing, the applicability of photogrammetry, developed in the early nineteenth century, tends to be extended to fields where conventionally it was not employed.

For this master thesis, the necessary means to reach new applications for photogrammetry were developed. Through massive data processing, equipment and computational tools, different applications were obtained where photogrammetry can be used as a very practical resource.

Through several cases study, it will be understood that there are several characteristics that photogrammetry is proud of. However, there are some features to improve in order to achieve better results and to erase the limits that this technique still has.

Photogrammetry proves to be a technique with high potential making it an asset in the field of reverse engineering.

Keywords: Reverse Engineering, photogrammetry, image processing, modelling, interoperability

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabela.....	xvii
Glossário.....	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Organização da Dissertação.....	4
2. A FOTOGRAMETRIA.....	7
2.1 Introdução	7
2.2 Enquadramento Histórico	7
2.3 Descrição da Técnica	12
2.4 Modelos Matemáticos da Fotogrametria	13
2.4.1 Triangulação Aérea	14
2.4.2 Transformação de Coordenadas	15
2.4.3 Matriz de Rotação	16
2.4.4 Equações de Colinearidade	18
2.5 Aquisição de Dados na Fotogrametria.....	25
2.5.1 Tipos de Aquisição.....	25
2.5.2 Requisitos da Aquisição.....	26
2.5.3 Equipamentos Necessários.....	28
1. Câmara Fotográfica.....	28
2. Tripé.....	30
3. Iluminação Artificial.....	30
4. <i>Drones</i>	31
5. Medidor de Distâncias	32

2.6	Imagem Digital.....	32
2.7	Técnicas de Processamento de Imagem Digital	33
2.6.1	Transformação e Filtros	33
2.6.2	Morfologia Matemática	34
1.	União de pixéis próximos.....	34
2.	Eliminação de pixéis vizinhos.....	35
3.	Supressão de conjuntos de pixéis	35
4.	Preenchimento ou eliminação de vazios	35
	<i>Dilatação e Erosão</i>	36
	<i>Abertura</i>	36
	<i>Fecho</i>	36
	<i>Hit-or-Miss transformation</i>	37
2.8	Ferramentas de Processamento de Dados	37
2.8.1	<i>Softwares</i> de Fotogrametria	37
2.8.2	<i>Softwares</i> de Geomática.....	38
2.8.3	<i>Softwares</i> do Tipo CAD.....	38
2.8.4	<i>Softwares</i> de Análise Numérica	38
2.8.5	<i>Softwares</i> de Rendering 3D.....	39
2.8.6	<i>Apps</i>	39
2.8.7	Interoperabilidade da Informação	40
2.9	Conclusões.....	41
3.	CASOS DE ESTUDO	43
3.1	Introdução.....	43
3.2	Caso de estudo: Objeto simples.....	44
3.2.1	Descrição do Objeto.....	44
3.2.2	Aquisição de Dados	45
1.	As condições de iluminação	45
2.	O equipamento utilizado	45
3.	As regras básicas de captura das fotografias	46
3.2.3	Processamento dos Dados	47
3.2.4	Modelo 3D	49

3.2.5	Observações	53
3.3	Casos de estudo: Construções reais	53
3.3.1	Caso de estudo: Paço dos Duques de Bragança	53
3.3.2	Caso de estudo: Mosteiro de Mancelos	54
3.3.3	Caso de estudo: Padrão do Salado	55
3.3.4	Caso de estudo: Malha espacial de madeira	55
4.	APLICAÇÕES DE FOTOGRAMETRIA.....	57
4.1	Introdução	57
4.2	Levantamentos Geométricos.....	58
1.	Levantamento de dados	58
2.	Geração da nuvem de pontos	59
4.2.1	Procedimentos e resultados	61
<i>Padrão do Salado</i>	61
<i>Mosteiro de Mancelos</i>	63
3.	Criação do modelo sólido	65
<i>Padrão do Salado</i>	66
<i>Mosteiro de Mancelos</i>	67
4.	Criação de planos.....	67
<i>Padrão do Salado</i>	68
<i>Mosteiro de Mancelos</i>	71
4.2.2	Parâmetros de controlo	73
4.2.3	Discussão dos resultados	73
4.3	Criação de Modelos Numéricos Estruturais	74
4.3.1	Procedimentos	76
4.3.2	Discussão dos resultados	78
4.4	Medição de Grandes Deformações	78
4.4.1	Procedimentos	79
4.4.2	Observações.....	82
4.5	Mapeamento e Análise de Anomalias	82

4.5.1	Procedimentos	83
1.	<i>Identificação através da cor</i>	83
2.	<i>Identificação através da intensidade de pixéis</i>	84
4.5.2	Discussão de resultados	87
4.6	Levantamento e Análise Histórica de Elementos Construtivos	87
4.6.1	Procedimentos	90
4.6.2	Discussão dos resultados	94
4.7	Modelos Virtuais para Promoção Turística	94
4.8	BIM	95
4.9	Limitações	96
	▪ <i>Objeto muito pequeno</i>	97
	▪ <i>Objetos finos ou transparentes</i>	97
	▪ <i>Vegetação</i>	99
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	101
5.1	Conclusões	101
5.2	Desenvolvimentos Futuros	102
	Bibliografia	103
	Anexo I - Relatório do Processamento do Padrão do Salado	109
	Anexo II - Relatório do Processamento do Mosteiro de Mancelos	115
	Anexo III - Planos Dos Levantamentos Geométricos	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Estrutura da Dissertação	5
Figura 2.1: Câmara de daguerreótipo	9
Figura 2.2: Estereocomparador	10
Figura 2.3: Cronograma da História da Fotogrametria	11
Figura 2.4: Esquema representativo da triangulação	15
Figura 2.5: Sistema de coordenadas definido no espaço-imagem	16
Figura 2.6: Eixo de coordenadas em função de três quantidades independentes.....	16
Figura 2.7: Sistema de coordenadas x	17
Figura 2.8: Sistema de coordenadas y	17
Figura 2.9: Sistema de coordenadas z	17
Figura 2.10: Condição de colinearidade.....	19
Figura 2.11: Paralelismo entre o sistema de coordenadas imagem e o sistema de coordenadas objeto	19
Figura 2.12: Relação métrica entre os sistemas de eixos imagem (x, y, z) e o eixo rodado....	21
Figura 2.13: Requisitos de aquisição de dados: Sobreposição de fotografias (Agisoft LLC 2011).....	27
Figura 2.14: Requisitos de aquisição de dados em espaços interiores (Agisoft LLC 2011)....	27
Figura 2.15: Requisitos de aquisição de dados no exterior (Agisoft LLC 2011).....	27
Figura 2.16: (a) Modelo gerado com fotografias captadas com câmara DSLR; (b) Modelo gerado com fotografias captadas com câmara compacta;	29
Figura 2.17: Phantom 3 Professional® com a Gimbal® e câmara fotográfica de 12 MP	32
Figura 2.18: Medidor de distâncias a <i>laser</i>	32
Figura 2.19: Elemento estruturante linear de comprimento $l = 3\text{pixéis}$: (a) possíveis direções para o elemento estruturante; (b) 90°; (c) 0°; (d) 45°; (e) 135°;.....	35
Figura 2.20: Eliminar <i>pixéis</i> isolados, $np \leq 10 \text{ pixéis}$: (a) antes; (b) depois;	36
Figura 3.1: Objeto de estudo simples	45
Figura 3.2: Distância focal	46
Figura 3.3: Modelo 3D do objeto de estudo simples	50
Figura 3.4: Modelo 3D com reduzido número de fotografias.....	51
Figura 3.5: Paço dos Duques, em Guimarães	54

Figura 3.6: Mosteiro de Mancelos, em Amarante	55
Figura 3.7: Padrão do Salado, em Guimarães.....	55
Figura 3.8: Malha espacial em madeira	56
Figura 4.1: Levantamento de dados com o <i>drone</i>	59
Figura 4.2: (a) Medição de distâncias consideradas importantes; (b) Medidor de distâncias; 59	
Figura 4.3: Posições do <i>drone</i> no levantamento das fotografias	62
Figura 4.4: (a) Nuvem de pontos; (b) Nuvem de pontos densa; (c) Malha tridimensional; ...	63
Figura 4.5: Posições da câmara fotográfica no levantamento do Mosteiro de Mancelos.....	64
Figura 4.6: (a) Nuvem de Pontos; (b) Nuvem de pontos densa;.....	64
Figura 4.7: (a) Criação de planos de referência; (b) Criação de esboço; (c) Extrusão de sólidos; (d) Modelo sólido final;	66
Figura 4.8: (a) Criação de planos de referência; (b) Criação de esboço; (c) Extrusão de sólidos; (d) Modelo sólido final;	67
Figura 4.9: Principais perspetivas do levantamento geométrico	70
Figura 4.10: Principais perspetivas do levantamento geométrico	72
Figura 4.11: Modelo geométrico importado no <i>FX+ da MIDAS®</i>	77
Figura 4.12: Modelo de elementos finitos no <i>FX+ da MIDAS®</i>	77
Figura 4.13: Identificação de colonização biológica na fachada principal do Mosteiro de Mancelos	84
Figura 4.14: Esquema representativo da ferramenta <i>Smooth</i> no <i>Geomagic Design X®</i>	85
Figura 4.15: Nuvem de pontos na fachada do Mosteiro de Mancelos.....	85
Figura 4.16: Alçado a Sudoeste do Paço dos Duques de Bragança após obras de restauro com ortofoto pormenorizada da alvenaria	91
Figura 4.17: Apresentação gráfica no <i>Sketchfab®</i>	95
Figura 4.18: Objeto muito pequeno	97
Figura 4.19: Malha espacial de madeira	98
Figura 4.20: Modelo 3D da malha espacial em madeira	98
Figura 4.21: Malha espacial de madeira em planta	98
Figura 4.22: Fachada principal do Mosteiro de Mancelos coberta por vegetação	99
Figura A. 1: Localizações da câmara e sobreposições de imagem	110
Figura A. 2: Resíduos de imagem para FC300X (3,61 mm)	111
Figura A. 3: Localizações de camara e erros estimados	111
Figura A. 4: Modelo de elevação digital reconstruído	112
Figura A. 5: Localizações da câmara e sobreposições de imagem.....	116

Figura A. 6: Resíduos de imagem para FC300X (3,61 mm).....	117
Figura A. 7: Localizações de camara e erros estimados	117
Figura A. 8: Modelo de elevação digital reconstruído	118

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1: Requisitos computacionais para gerar modelos no <i>Agisoft PhotoScan</i> ®.....	48
Tabela 3.2: Características dos modelos gerados no <i>Agisoft PhotoScan</i> ®	52
Tabela 4.1: Resumo do levantamento do Padrão do Salado	61
Tabela 4.2: Reconstituição do modelo do Padrão do Salado	62
Tabela 4.3: Resumo dos dados do levantamento do Mosteiro de Mancelos.....	63
Tabela 4.4: Características do modelo.....	64
Tabela 4.5: Procedimento para medir a deformação na fachada do Paço dos Duques	80
Tabela 4.6: Tipo de anomalias detetáveis através dos parâmetros de cor RGB e intensidade de <i>pixéis</i>	83
Tabela 4.7: Anomalias na fachada principal do Mosteiro de Mancelos.....	86
Tabela 4.8: Principais elementos primitivos de alvenaria de pedra	89
Tabela 4.9: Elementos construtivos da fachada da Paços dos Duques de Bragança.....	92
Tabela A. 1: Características do levantamento.....	110
Tabela A. 2: Características da camara fotográfica.....	110
Tabela A. 3: Erro do levantamento	111
Tabela A. 4: Características do levantamento	116
Tabela A. 5: Características da camara fotográfica.....	116
Tabela A. 6: Erro do levantamento	117

GLOSSÁRIO

Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
b	bit
B	byte
cm	centímetro
GB	Gigabyte
hBIM	heritage BIM
m	metro
MB	Megabyte
mm	milímetro
MP	Megapixéis
Pix	Pixel

Maiúsculas latinas

K	resolução horizontal com 1.000 pixéis
L	centro de projeção

Minúsculas latinas

f	distância focal
l	número de pixéis

Letras gregas

κ	ângulo em torno de z
ϕ	ângulo em torno de y
ω	ângulo em torno de x

Matrizes

M^T	Matriz de rotação transposta
M	Matriz de rotação

Vetores

\vec{A}	Vetor espaço-objeto
\vec{a}	Vetor espaço-imagem

Siglas

ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
DSLR	Digital Single-lens Reflex Camara
FEM	Finite Elements Modeling
GPS	Global Position System
IFC	Industry Foundation Classes
ISO	International Organization for Standardization
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
MM	Morfologia Matemática
NIST	National Institute of Standards and Technology
RAM	Random Access Memory
RGB	Red, Green, Blue
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Atualmente, é unânime o conceito que a esperada revitalização da Construção e da Engenharia Civil irá incidir essencialmente na reabilitação do edificado. Portanto, para intervir nesse edificado, são necessárias ferramentas e métodos diferentes dos utilizados nos casos de obras novas, como por exemplo: o levantamento geométrico e das patologias e o diagnóstico estrutural, em especial nas construções mais antigas e/ou complexas. Estas tarefas são de elevada importância, não só para a sociedade em geral, mas também para as instituições ligadas à preservação do Edificado e do Património Histórico e Cultural. Dentro do leque das técnicas e métodos que atualmente existem para a execução dessas tarefas, a fotogrametria foi a técnica analisada nesta dissertação.

Os primeiros campos de aplicação na fotogrametria baseavam-se apenas na cartografia, mas atualmente este campo de aplicação abrange muitas outras áreas de interesse. As técnicas de captação de imagem têm sofrido ao longo dos anos uma (r)evolução acentuada. Embora as raízes desta técnica tenham sido desenvolvidas logo nos finais do século XV, só com os avanços mais recentes em *hardware* e aplicações digitais e tecnologias têm colocado a possibilidade da

modelação tridimensional. Esta crescente evolução que se tem vindo a assistir desde a ampla gama de câmaras fotográficas digitais de elevado desempenho à grande capacidade de processamento dos computadores pessoais, aumentou significativamente o âmbito de possíveis aplicações da fotogrametria. No Património Histórico e Cultural, a falta de informação ou até mesmo da sua desatualização justifica a realização de levantamentos rápidos e sofisticados da geometria e das anomalias. Adicionalmente, a complexidade deste tipo de construções torna frequentemente necessário o recurso à modelação para a correta avaliação da segurança estrutural, com especial ênfase para a segurança sísmica. Os casos enunciados são alguns dos problemas em que o uso de levantamentos com fotogrametria pode ajudar a resolver. Aspectos como o tempo exigido para a realização de um levantamento geométrico, a abundância de informação e a possibilidade de imediata utilização do produto final são alguns dos pontos fortes da fotogrametria. Uma correta análise e levantamento fotográfico da construção, com fotografias tiradas de diferentes pontos, de forma a haver sobreposição de imagens suficiente, resultam num conjunto de pontos com informação tridimensional e radiométrica que possibilitam a construção de modelos necessários para todo o processo conseguinte.

Atualmente, os *drones* (veículo aéreo não tripulado ou UAV) são cada vez mais populares e possuem as mais diversificadas utilidades, sendo que o recurso a estes dispositivos torna-se uma realidade acessível para a tecnologia da construção. A capacidade que apresentam para captar dados em várias vertentes na envolvente de uma edificação faz deste dispositivo uma ferramenta muito vantajosa na utilização da fotogrametria. A liberdade da utilização dos drones combinada com a técnica da fotogrametria, tornam estas ferramentas bastante apelativas, com um custo-benefício bastante atrativo.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é perceber, aplicar e potenciar o uso da fotogrametria nas mais variadas tarefas de inspeção e diagnóstico estrutural, com recurso a fotografias manuais ou captadas através de *drones*. Pretende-se estudar diferentes casos de estudo onde a fotogrametria pode ser aplicada com diferentes fins, nos quais se verifica a sua utilidade como

ferramenta de futuro na Engenharia Civil. Os objetivos específicos neste estudo são:

- Análise da bibliografia existente sobre o tema;
- Realização de levantamentos fotográficos em vários casos de estudo com recurso a *drones*;
- Aplicação da técnica de fotogrametria para diferentes aplicações:
 - a) Levantamento geométrico;
 - b) Criação de modelos numéricos de elementos finitos;
 - c) Medição de grandes deformações;
 - d) Mapeamento e análise de anomalias;
 - e) Levantamento e análise histórica de elementos construtivos;
- Modelos virtuais para promoção turística.
- Análise da complementaridade da técnica com outras ferramentas de inspeção e diagnóstico;
- Análise da informação recolhida e recomendações para trabalhos futuros.

1.3 Metodologia

A fase inicial do desenvolvimento desta dissertação passará pela revisão do estado de conhecimento através da leitura e análise de artigos científicos publicados relacionados com o levantamento e diagnóstico estrutural através da fotogrametria. Após esta pesquisa proceder-se-á à realização de vários levantamentos fotográficos com o intuito de recolher a informação necessária para modelar em 3D e para a criação de nuvens de pontos. Para este conjunto de modelações, foi necessário recorrer a um conjunto de ferramentas computacionais que permitem a extração de informação útil no âmbito da Engenharia Civil. Para cada aplicação referida foram utilizadas diferentes aplicações informáticas. Essas aplicações, devido à sua especificidade, requereram algum tempo de aprendizagem.

1.4 Organização da Dissertação

A presente dissertação é composta por um conjunto de quatro capítulos iniciando-se pelo capítulo 1, a introdução.

No capítulo 2, são abordados os conceitos introdutórios para a técnica de fotogrametria assim como a sua descrição e ferramentas necessárias para a sua prática.

No capítulo 3 são citados todos os casos de estudo que fizeram parte desta dissertação e as correspondentes características e interesses para futura análise.

No capítulo 4 são representadas as aplicações de fotogrametria que foram estudadas no desenvolver do projeto com os respectivos procedimentos e observações/limitações.

No capítulo 5 estão apresentadas as conclusões acerca do desenvolvimento de toda a técnica da fotogrametria, bem como os aspetos mais importantes a ter para uma futura investigação.

Na Figura 1.1 apresenta-se um organograma onde é possível contemplar a informação mais relevante em cada capítulo:

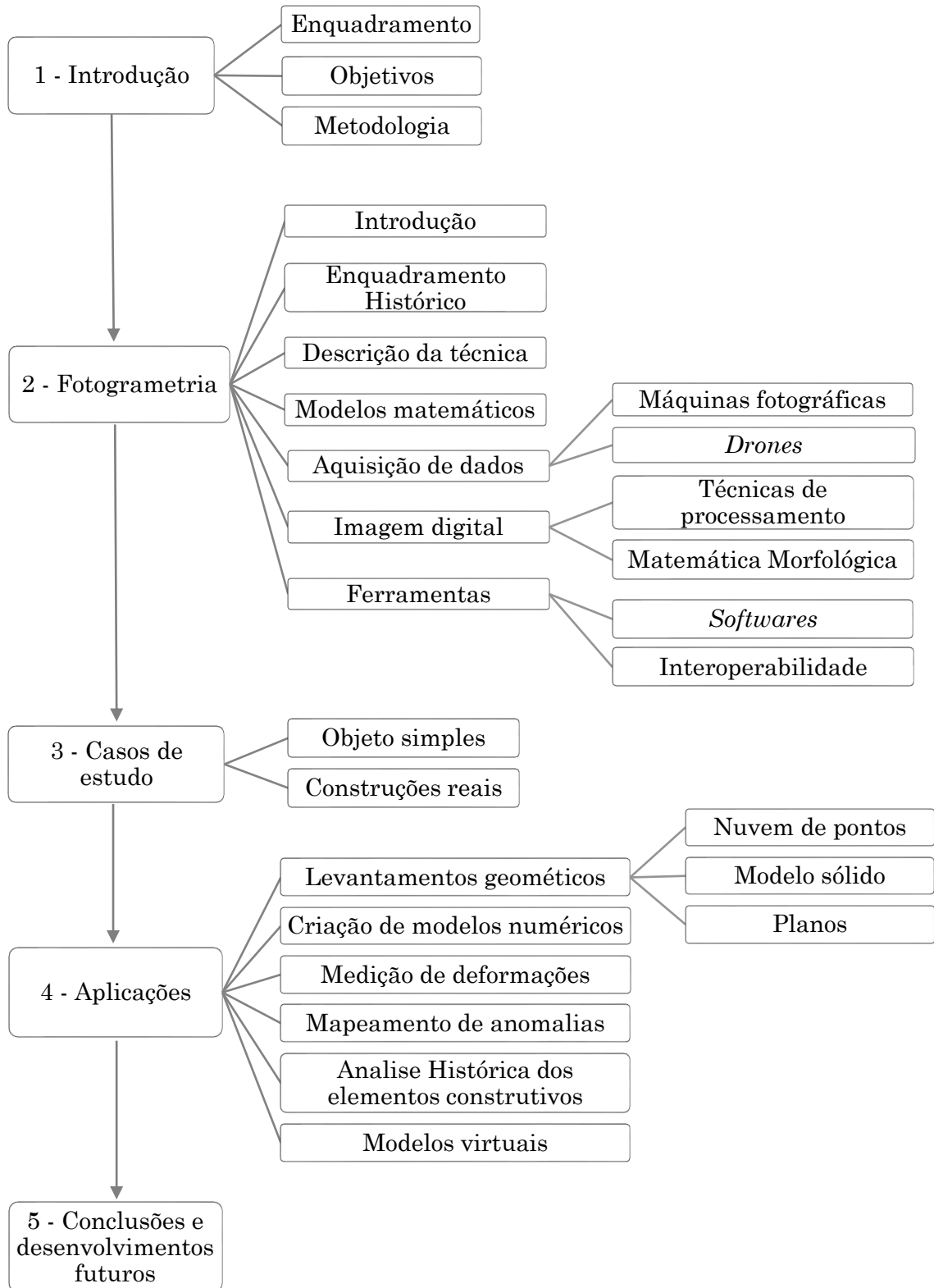


Figura 1.1: Estrutura da Dissertação

2. A FOTOGRAMETRIA

2.1 Introdução

O presente capítulo procura apresentar as principais noções sobre a fotogrametria na área de interesse desta dissertação, nomeadamente: o enquadramento histórico, a descrição da técnica, a formulação matemática, a forma como se podem adquirir os dados, a imagem digital, os equipamentos que são necessários e, por fim, as ferramentas que se encontram disponíveis no ramo da fotogrametria. A composição deste capítulo pretende a perceção de forma clara e estruturada dos conceitos alusivos à técnica fotogramétrica como uma espécie de noção introdutória para as aplicações representadas nos capítulos seguintes.

2.2 Enquadramento Histórico

O termo fotogrametria é derivado das três palavras gregas, *photon*, *graphos* e *metron*, que significam, respetivamente, luz, descrição e medições.

Embora a fotogrametria esteja diretamente relacionada com a fotografia, as suas raízes advêm da época dos pintores renascentistas que estudaram os princípios envolvidos na análise geométrica nos finais do século XV (Ghosh 1992).

Em 1480, Leonardo da Vinci escreveu o seguinte: "*A perspectiva é nada mais do que a visão de um objeto através de uma folha de vidro, lisa e bastante transparente, sobre uma superfície onde todas as coisas que estão por detrás desse vidro podem ser marcadas. Todas as coisas transmitem as suas imagens para o olho por linhas piramidais, e essas pirâmides são cortadas por este vidro. Quanto mais próximo do olho estão intersectadas, menor será a imagem que irá aparecer*". Em 1492 começou a trabalhar com a perspectiva e com as projeções centrais com a invenção da Lanterna Mágica¹, embora não haja nenhuma evidência de que terá sido ele que realmente a construiu e até alguns afirmam que este dispositivo remonta aos antigos gregos (Duerer 1977).

A geometria projetiva constitui o estudo das propriedades descritivas das figuras geométricas e os seus princípios formaram a base a partir da qual a teoria da fotogrametria foi desenvolvida, donde resultaram vários trabalhos nos séculos XVII e XVIII.

Da Vinci contribuiu para a compreensão da geometria projetiva do ponto de vista gráfico, enquanto outros cientistas contribuíram do ponto de vista matemático. Por exemplo, Albrecht Duerer em 1525 utilizou as leis da perspectiva para criar um instrumento que gerava um desenho em perspectiva verdadeira.

Em 1760, Johann Heinrich Lambert, matemático, físico e filósofo, estabeleceu os fundamentos teóricos para resolver o problema da reconstituição da imagem em perspectiva, usando um método para encontrar um ponto no espaço a partir do qual a imagem é construída.

A relação entre a geometria projetiva e a fotogrametria foi desenvolvida por R. Sturms e Guido Hauck na Alemanha em 1833, ano em que surgiu também a primeira fotografia obtida por Joseph Nicephone Niépce, ainda que, necessitasse de oito horas de exposição de luz (Duerer 1977).

¹ Lanterna Mágica é o termo que se apelidou para um dispositivo que funciona como um projetor de slides atualmente.

No ano seguinte, em 1837, Jacques Mandé Daguerre obteve a primeira fotografia "prática", através de um processo fotográfico chamado o daguerreótipo e com uma câmara de daguerreótipo (ver Figura 2.1).



Figura 2.1: Câmara de daguerreótipo (Corrêa 2013)

Por volta de 1840, o geodesta francês, Dominique François Jean Arago, começou a defender o uso da fotogrametria, usando o daguerreótipo, na frente das Artes e Ciências da Academia Francesa (Duerer 1977). E em 1858, o francês Aimé Laussedat conseguiu obter planos exatos de edifícios e de pequenas extensões de terreno a partir da fotografia, sendo este o marco do início da técnica – *a fotogrametria ordinária* (Duerer 1977). Contudo, este método tinha as suas divergências e a identificação de um mesmo ponto em duas fotografias tiradas de pontos de vista diferentes era um deles. Por conseguinte, este processo apresentava-se muito moroso, uma vez que a reconstituição de um ponto implicava uma grande quantidade de cálculos.

Os avanços da fotogrametria foram lentos até que em 1901, o alemão Pulfrich aplicou o princípio da visão em relevo para efetuar medidas estereoscópicas, por meio de uma invenção sua que apelidou de estereocomparador (ver Figura 2.2), que tinha a capacidade de determinar coordenadas ponto a ponto – *estereofotogrametria*. Este foi um enorme passo no desenvolvimento da técnica que cominou com o passo definitivo para a concretização da *fotogrametria* com uma técnica, em 1909, quando o austríaco Von Orel construiu o estereoautógrafo, o primeiro aparelho utilizado para a construção e obtenção automática de planos (Valença 2006).

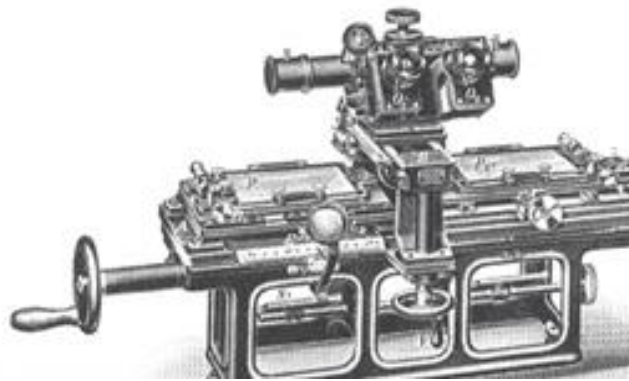


Figura 2.2: *Estereocomparador* (Oliveira 2002)

Durante a 1ª Grande Guerra Mundial houve a necessidade de desenvolver meios para a obtenção de fotografias aéreas dos campos inimigos, levando à otimização dos processos e equipamentos utilizados, dando origem à - *fotogrametria automática* (Dezen-Kempton et al. 2015).

Após o surgimento da fotogrametria houveram quatro ciclos que se caracterizaram por descobertas também consideradas revolucionárias para o seu desenvolvimento, cada um deles desenvolvido por cerca de cinquenta anos. Para a representação destes ciclos e das suas principais invenções está ilustrado na Figura 2.3 o cronograma onde é identificada a data de invenção da fotografia, do avião e do computador, os marcos mais importantes que ajudaram no progresso do desenvolvimento da fotogrametria.

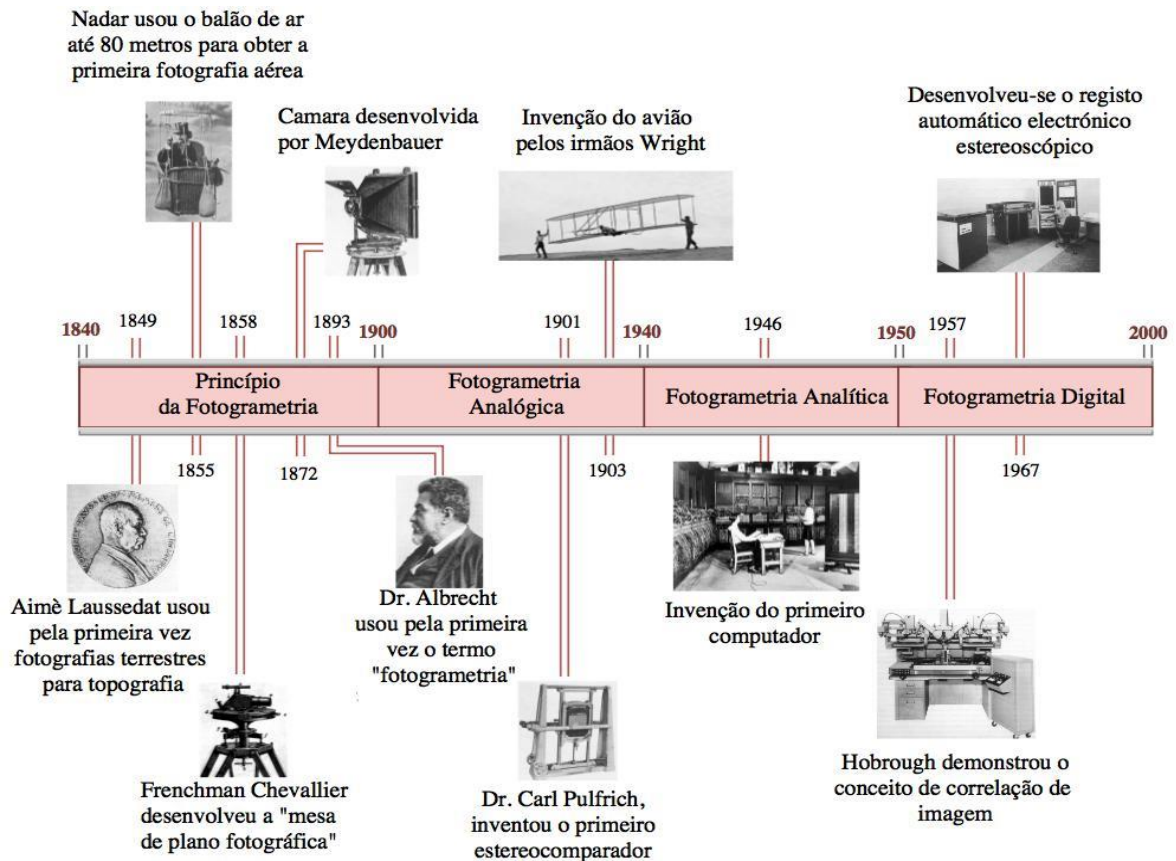


Figura 2.3: Cronograma da História da Fotogrametria

Com o evoluir da técnica, começaram a surgir os primeiros grupos organizados de investigadores e utilizadores em torno da fotogrametria. A Sociedade Internacional de Fotogrametria e Deteção Remota (ISPRS) é uma instituição não-governamental fundada em 1910 na Áustria que se dedica ao desenvolvimento da cooperação internacional e ao avanço da fotogrametria e deteção remota assim como as suas aplicações (ISPRS 2016). Segundo esta instituição a “*fotogrametria e a deteção remota é a arte, ciência e tecnologia de se obter informação confiável de imagens através de sensores e outros, sobre a Terra e o seu meio-ambiente, e outros objetos físicos e processos através da gravação, medição, análise e representação*”. Após a leitura desta definição, percebe-se que há claramente a junção do conceito de fotogrametria e deteção remota, sendo esta última, uma outra técnica que nos permite obter informações sobre os objetos, mas através de dados obtidos por sensores distantes ou remotos, normalmente presentes em plataformas orbitais ou satélites e que têm um custo muito mais elevado do que a fotogrametria.

Mais tarde, em 1934, surgiu a Sociedade Americana de Fotogrametria e Detecção Remota (ASPRS), outra associação científica que dispõe de mais de 7 000 membros profissionais em todo o mundo, com a missão de fazer avançar o conhecimento e melhorar a compreensão das ciências de mapeamento, para promover as aplicações da fotogrametria, da detecção remota, dos sistemas de informação geográfica e das tecnologias de suporte (A. Professional 1990). Para a ASPRS a fotogrametria é “*a arte, ciência, e tecnologia de se obter informação confiável sobre objetos físicos e o meio-ambiente, através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos*”. Esta definição é a que hoje em dia mais se destaca em livros e textos científicos sobre o tema, onde a detecção remota não recebe qualquer visibilidade. Para esta associação e ao contrário da ISPRS, subsiste a distinção entre os conceitos de fotogrametria e detecção remota. Ao longo desta dissertação, é esta última definição que será tida em conta como a definição da fotogrametria.

2.3 Descrição da Técnica

A prática da fotogrametria é particularmente útil quando o objeto a ser medido é de difícil acesso e quando é necessário efetuar o seu levantamento geométrico. A fotogrametria representa uma técnica alternativa para os procedimentos de levantamento manuais, uma vez que permite obter uma grande densidade de informação de uma forma rápida. Permite, também, registar com precisão a forma real dos objetos, as suas irregularidades e imperfeições decorrentes do processo construtivo, e as deformações e danos decorrentes do ciclo de vida do edifício (Dezen-Kempton et al. 2015).

A fotogrametria está dividida em duas grandes áreas de acordo com o tipo de recursos utilizados na sua execução, podendo ser métrica ou interpretativa. A fotogrametria métrica consiste na elaboração de medições de imagens e outras fontes de informação para determinar, de um modo geral, o posicionamento relativo dos pontos, obtendo-se, como resultados, as distâncias, ângulos, áreas e volumes de objetos (Temba 2001). Por outro lado, a fotogrametria interpretativa permite o reconhecimento e a identificação dos objetos e o seu significado, a partir da análise sistemática e cuidadosa de fotografias (Duerer 1977).

A realização de bons levantamentos fotogramétricos exige um trabalho de pesquisa e de campo. Como procedimentos a seguir para obter estes levantamentos apresentam-se os seguintes passos:

1. Realização dum análise do objeto/estrutura a levantar e da sua envolvente e, caso seja necessário, a área envolvente deve ser limpa para reduzir o aparecimento de elementos indesejados nas fotografias captadas, como por exemplo vegetação;
2. Seleção dos equipamentos que irão fazer parte do levantamento;
3. Planeamento e determinação do tipo de fotografias necessárias. Definindo as posições e distâncias entre o objeto/estrutura, a posição da câmara fotográfica e os intervalos de captação das fotografias. Caso se trate de um levantamento com sistemas aéreos é necessário elaborar um plano de voo;
4. Levantamento, seleção e análise dos dados para posterior processamento;
5. Processamento dos dados obtidos com um *software* fotogramétrico.

Estes passos permitem, de uma forma geral, a criação de um modelo através de uma nuvem de pontos no sistema de coordenadas tridimensionais que representam a forma real do objeto/estrutura.

2.4 Modelos Matemáticos da Fotogrametria

Em termos práticos, a fotogrametria consiste na transformação de imagens planas em imagens tridimensionais. Usar a fotogrametria para resolver problemas de posição espacial conduz inevitavelmente à utilização de equações matemáticas. A forma destas equações reflete a natureza das observações, tanto da imagem plana (2D), como da tridimensional (3D), em particular os problemas que se pretendem resolver pela orientação relativa. Fazem parte deste estudo os conceitos de triangulação, matriz de rotação e as equações de colinearidade.

As seções seguintes apresentam os principais modelos e formulações matemáticas usados em fotogrametria.

2.4.1 Triangulação Aérea

A triangulação é um método matemático muito conhecido na fotogrametria aérea e consiste em estabelecer uma relação entre as imagens captadas, a câmara fotográfica e a posição do objeto em estudo. Esta relação permite determinar a localização espacial de um ponto no objeto através da formação de triângulos “imaginários” que são construídos através de pontos conhecidos georreferenciados. Isto porque o equipamento utilizado para a aquisição das fotografias, o *drone*, possui um recetor GPS e uma câmara que regista os instantes de exposição fazendo com que cada fotografia captada tenha as coordenadas GPS associadas.

A triangulação aérea com o apoio do GPS veio permitir boas precisões das coordenadas dos centros de projeção, de tal modo que os pontos fotogramétricos (PF) deixaram de ser relevantes no levantamento fotogramétrico. Estes pontos funcionavam como um apoio para a técnica de fotogrametria que consistia na coordenação de determinados pontos indispensáveis à realização do processo da triangulação aérea. Traduziam a relação existente entre os pontos determinados na fotografia e os seus homólogos no objeto, podendo ser de origem quer em objetos naturais quer artificiais (Pereira 2005).

A triangulação aérea consiste na observação de um objeto através de fotografias captadas de duas posições diferentes, onde os seus centros de projeção e o ponto considerado na superfície do objeto definem um triângulo no espaço (ver Figura 2.4). Dentro desse triângulo, a posição em que cada fotografia foi captada (x,y,z) e a base (b) deve ser conhecida (Pereira 2005). Ao determinar os ângulos entre os raios de projeção, juntamente com a base, o ponto de intersecção e as coordenadas tridimensionais desse ponto são calculadas a partir de relações triangulares.

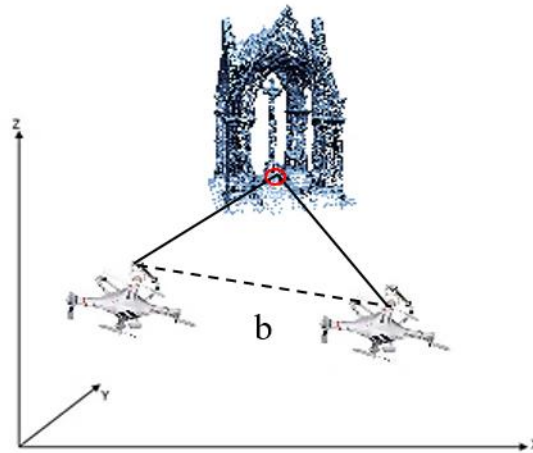


Figura 2.4: Esquema representativo da triangulação

2.4.2 Transformação de Coordenadas

A conversão de coordenadas obtidas em sistemas de coordenadas diferentes é uma tarefa comum na fotogrametria. É a base de resolução para dois importantes problemas (Wolf 1983):

- Converter as coordenadas dos pontos de uma fotografia, num sistema de coordenadas próprio, para um outro sistema de coordenadas, equivalente ao da fotografia, e que é paralelo ao sistema de coordenadas do terreno ou a um outro sistema de coordenadas objeto arbitrário;
- Permitir a construção de modelos completos através de modelos parciais.

Existem três sistemas de coordenadas usados na fotogrametria. Para relacionarmos as imagens dos objetos com os próprios objetos é necessário estabelecer sistemas de coordenadas nos quais se possam referenciar os pontos-imagem e os pontos-objeto. Para tal definem-se três sistemas de coordenadas (Wolf 1983):

- O sistema de coordenadas da fotografia (2D) que é definido no plano da fotografia com origem no ponto médio; ponto de interseção das duas retas que unem as marcas referentes diametralmente opostas;
- O sistema de coordenadas da fotografia (3D) (x, y, z) é definido no espaço-imagem e tem origem no centro de projeção (L), sendo dois dos seus eixos paralelos aos das

coordenadas da fotografia ($x'o, y'o$) e o terceiro eixo de modo a que o sistema de eixos seja direto;

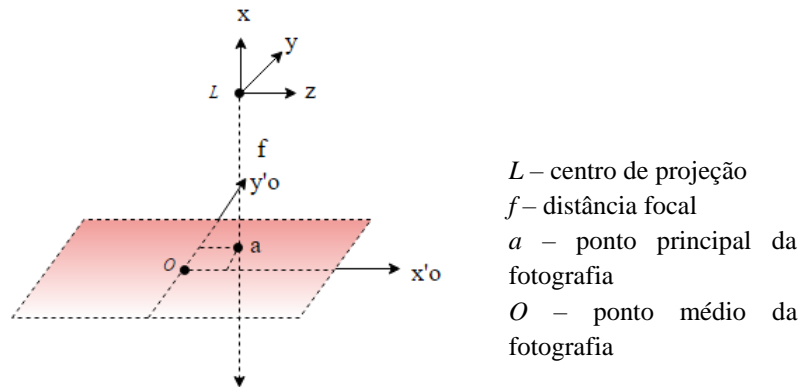


Figura 2.5: Sistema de coordenadas definido no espaço-imagem

- O sistema de coordenadas do objeto (3D) é um sistema direto, com origem das coordenadas e orientação dos seus eixos dependentes do sistema escolhido para referenciar o objeto. As suas coordenadas são normalmente designadas por (X, Y, Z) .

2.4.3 Matriz de Rotação

A matriz de rotação M com a dimensão de 3×3 é muitas vezes utilizada no processamento matemático de pontos em função de três grandezas independentes. Estas grandezas são geralmente as rotações sequenciais, designadas por ω , ϕ e κ sobre os eixos x , y , e z , respetivamente, como se pode observar na Figura 2.5.

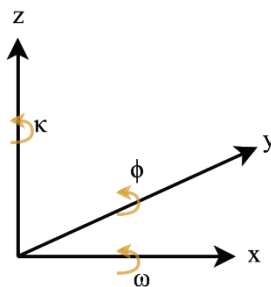


Figura 2.6: Eixo de coordenadas em função de três quantidades independentes

A matriz M de rotação é definida em função dos ângulos de Euler (ω , ϕ , κ) de tal forma que:

$$M = M_{\kappa} M_{\phi} M_{\omega} \tag{2.1}$$

onde, considerando os efeitos de rotação em torno de ω no eixo de sistema de coordenadas x , apresentados em forma da matriz M_ω , tem-se:

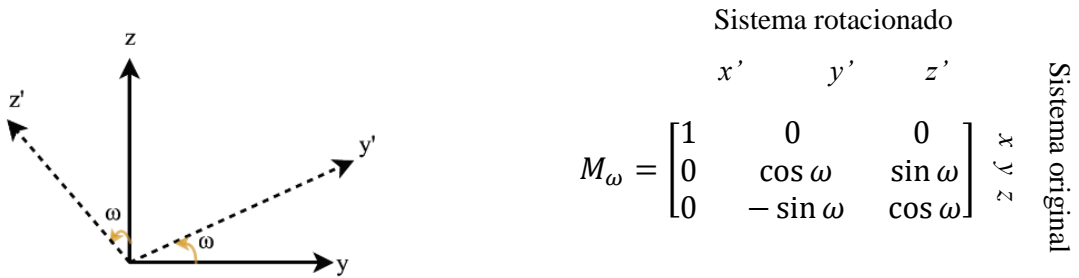


Figura 2.7: Sistema de coordenadas x

considerando os efeitos de rotação em torno de ϕ no eixo do sistema de coordenadas y , apresentados em forma da matriz M_ϕ , tem-se:

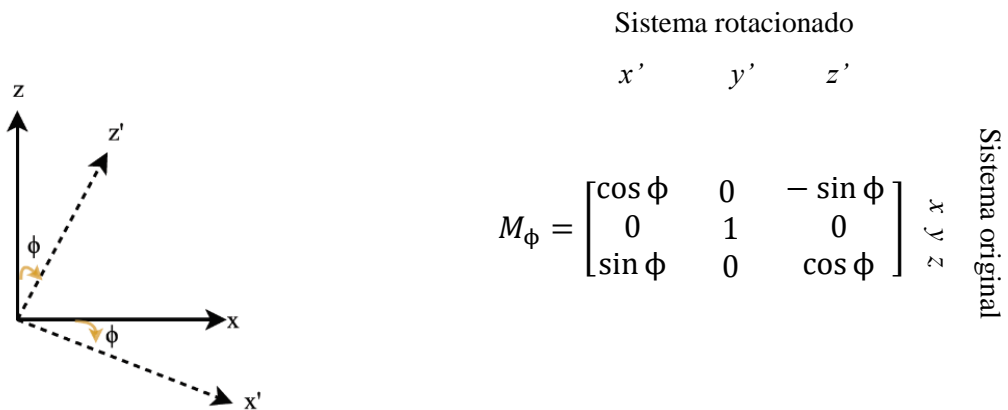


Figura 2.8: Sistema de coordenadas y

e considerando os efeitos de rotação em torno de κ no eixo do sistema de coordenadas z , apresentados em forma da matriz M_κ , tem-se:

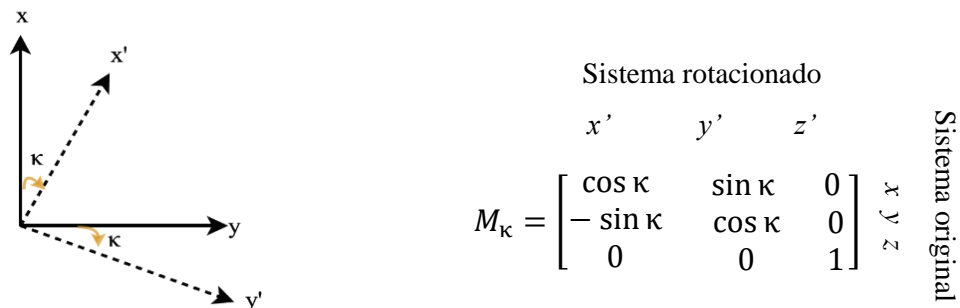


Figura 2.9: Sistema de coordenadas z

ficando,

M

$$= \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\ -\cos \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Para fins de manipulação matemática posterior considera-se:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A aproximação ocasionalmente útil desta matriz a pequenos ângulos, i.e., quando a imagem é muito próxima da vertical e é feita a suposição de que todos os cossenos são iguais à unidade e o produto de senos igual a zero, é dada por:

$$M \approx \begin{bmatrix} 1 & \kappa & -\phi \\ -\kappa & 1 & \omega \\ \phi & -\omega & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.4.4 Equações de Colinearidade

O facto de, num determinado instante da exposição fotográfica, um ponto no objeto, a sua representação fotográfica e o centro do sistema ótico da câmara fotográfica se encontrarem sobre uma mesma reta permite estabelecer relações geométricas entre os sistemas de coordenadas do ponto, conhecidas por relações de colinearidade (ver Figura 2.10) (Casaca et al. 2000).

As relações de colinearidade, dadas pelas equações de colinearidade, são talvez as mais importantes que a fotogrametria utiliza. Relaciona as formas descritas no espaço-imagem e no espaço-objeto. A condição de colinearidade admite que o centro da perspectiva da câmara, o ponto na fotografia e o seu correspondente no seu espaço-objeto são colineares (alinhados).

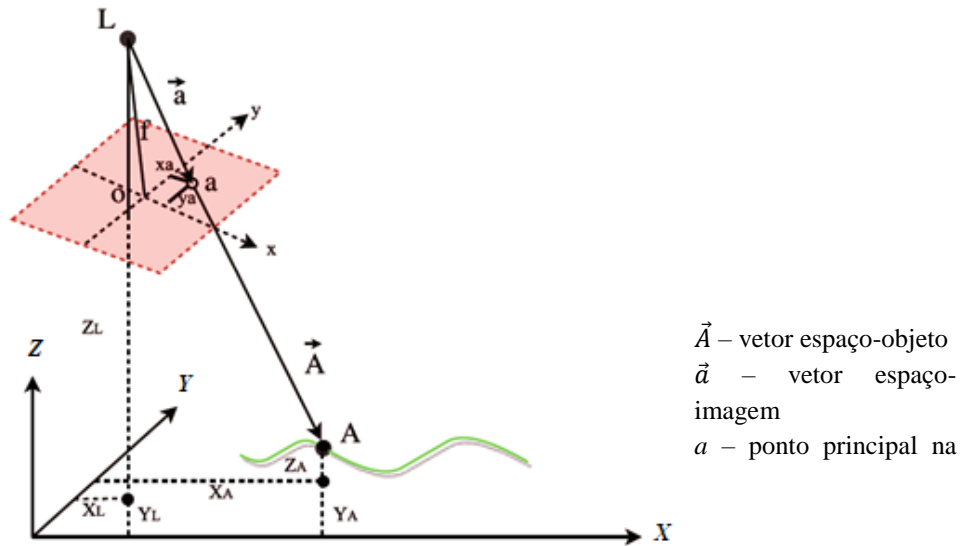


Figura 2.10: Condição de colinearidade

O ponto A, no objeto, de coordenadas (X_A, Y_A, Z_A) , terá a sua imagem na fotografia no ponto a , sendo as suas coordenadas (x_a, y_a, z_a) .

Considere-se agora, uma rotação no plano da imagem, tal que o ponto a , com coordenadas (x_a, y_a, z_a) na fotografia inclinada, como na figura anterior, terá coordenadas (x'_a, y'_a, z'_a) no sistema (x', y', z') paralelo a (X, Y, Z) – sistema de coordenadas objeto - (Figura 2.11).

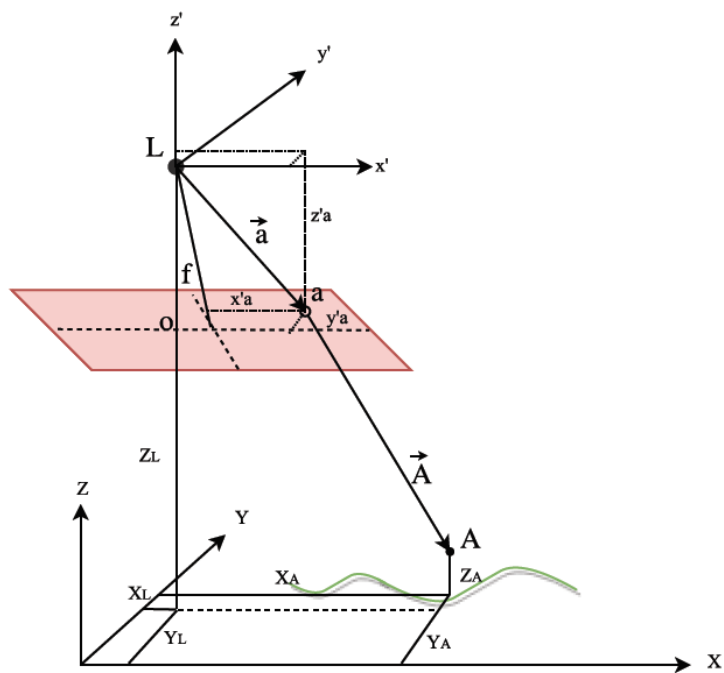


Figura 2.11: Paralelismo entre o sistema de coordenadas imagem e o sistema de coordenadas objeto

As coordenadas do ponto a dependem das coordenadas do sistema rodado, da distância focal, f , e dos ângulos, ω , ϕ e κ , sendo escritas da seguinte forma:

$$\begin{cases} y_a = m_{21}x'_a + m_{22}y'_a + m_{23}z'_a \\ y_a = m_{21}x'_a + m_{22}y'_a + m_{23}z'_a \\ z_a = m_{31}x'_a + m_{32}y'_a + m_{33}z'_a \end{cases} \quad (2.5)$$

Recorda-se os valores dos m 's da matriz definida em (2.2).

O que é equivalente a ter, em forma matricial:

$$X_a = M X'_a \quad (2.6)$$

Onde,

$$X_a = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$X'_a = \begin{bmatrix} x'_a \\ y'_a \\ z'_a \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Note-se que $z_a = -f$ (distância focal com sinal negativo), conforme demonstra a Figura 2.12.

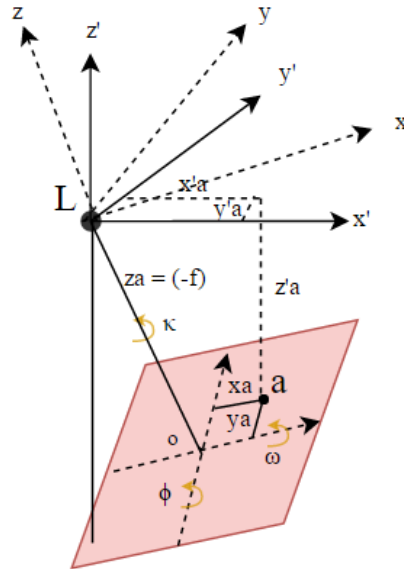


Figura 2.12: Relação métrica entre os sistemas de eixos imagem (x, y, z) e o eixo rodado (x', y', z')

Da Figura 2.11, através das relações de semelhança entre triângulos, desenvolvem-se as equações de colinearidade, como se apresenta em seguida:

$$\frac{x'_a}{X_A - X_L} = \frac{y'_a}{Y_A - Y_L} = \frac{z'_a}{Z_A - Z_L} \quad (2.10)$$

Reduzindo,

$$x'_a = \left(\frac{X_A - X_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a \quad (2.11)$$

$$y'_a = \left(\frac{Y_A - Y_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a \quad (2.12)$$

E por identidade,

$$z'_a = \left(\frac{Z_A - Z_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a \quad (2.13)$$

Substituindo (2.11), (2.12) e (2.13), nas equações (2.1), vem,

$$x_a = m_{11} \left(\frac{X_A - X_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a + m_{12} \left(\frac{Y_A - Y_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a + m_{13} \left(\frac{Z_A - Z_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a \quad (2.14)$$

$$y_a = m_{21} \left(\frac{X_A - X_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a + m_{22} \left(\frac{Y_A - Y_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a + m_{23} \left(\frac{Z_A - Z_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a \quad (2.15)$$

$$z_a = m_{31} \left(\frac{X_A - X_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a + m_{32} \left(\frac{Y_A - Y_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a + m_{33} \left(\frac{Z_A - Z_L}{Z_A - Z_L} \right) z'_a \quad (2.16)$$

Dividindo cada uma das anteriores equações pelo termo $\left(\frac{z'_a}{Z_A - Z_L} \right)$, dividir em seguida as equações em x_a e em y_a pela equação de z_a e substituindo z_a por $(-f)$ chegamos ao nosso objetivo, as expressões para as equações de colinearidade, conforme se apresentam.

$$x_a = -f \left[\frac{m_{11}(X - X_P) + m_{12}(Y - Y_P) + m_{13}(Z - Z_P)}{m_{31}(X - X_P) + m_{32}(Y - Y_P) + m_{33}(Z - Z_P)} \right] \quad (2.17)$$

$$y_a = -f \left[\frac{m_{21}(X - X_P) + m_{22}(Y - Y_P) + m_{23}(Z - Z_P)}{m_{31}(X - X_P) + m_{32}(Y - Y_P) + m_{33}(Z - Z_P)} \right]$$

Generalizando, estas equações de colinearidade expressam a relação entre as coordenadas fotográficas de qualquer ponto e as respectivas coordenadas do objeto, i.e.,

$(x, y) = F [(X_L, Y_L, Z_L), (X, Y, Z), (\omega, \varphi, \kappa)]$, onde:

$F_x = f [(X_L, Y_L, Z_L), (X, Y, Z), (\omega, \varphi, \kappa)]$ e,

$F_y = g [(X_L, Y_L, Z_L), (X, Y, Z), (\omega, \varphi, \kappa)]$

As equações de colinearidade também se podem exprimir em ordem às coordenadas do objeto/terreno. Como já vimos $X = MX'$, sendo M uma matriz de rotação, ortogonal. Assim, vem que $M^T X = M^T M X'$ e como $M^T M = I$, temos $M^T X = X'$. O que é o mesmo que dizer:

$$\begin{aligned}
x' &= m_{11}(x - x_l) + m_{21}(y - y_l) + m_{31}(z - z_l) \\
y' &= m_{12}(x - x_l) + m_{22}(y - y_l) + m_{32}(z - z_l) \\
z' &= m_{13}(x - x_l) + m_{23}(y - y_l) + m_{33}(z - z_l)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Para chegar às equações que nos permitam obter as coordenadas no sistema (X, Y, Z) é necessário multiplicar as equações (2.18), por um fator de escala e fazer uma translação, obtendo-se,

$$(X, Y) = \mathbf{F} [(xl, yl, zl), (x, y, z), (\omega, \varphi, \kappa)] . \text{ i.e.:}$$

$$\begin{aligned}
X &= sx' + X_L = s [m_{11}(x - x_l) + m_{21}(y - y_l) + m_{31}(z - z_l)] + X_L \\
Y &= sy' + Y_L = s [m_{12}(x - x_l) + m_{22}(y - y_l) + m_{32}(z - z_l)] + Y_L \\
Z &= sz' + Z_L = s [m_{13}(x - x_l) + m_{23}(y - y_l) + m_{33}(z - z_l)] + Y_L
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Da última equação podemos tirar o valor do fator de escala s :

$$s = \frac{Z - Z_L}{m_{13}(x - x_l) + m_{23}(y - y_l) + m_{33}(z - z_l)} \tag{2.20}$$

Resultando,

$$\begin{aligned}
X &= X_L + (Z - Z_L) \left(\frac{m_{11}(x - x_l) + m_{21}(y - y_l) + m_{31}f}{m_{13}(x - x_l) + m_{23}(y - y_l) + m_{33}f} \right) \\
Y &= Y_L + (Z - Z_L) \left(\frac{m_{12}(x - x_l) + m_{22}(y - y_l) + m_{32}f}{m_{13}(x - x_l) + m_{23}(y - y_l) + m_{33}f} \right)
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Analisando os dois conjuntos de equações de colinearidade (2.17 e 2.21), podemos verificar que:

- pelas equações (2.17), a cada ponto de coordenadas no objeto (X, Y, Z) vai corresponder (nesta projeção) um único ponto imagem;
- pelas equações (2.21), as coordenadas (X, Y) de um ponto imagem são dependentes da própria coordenada Z do objeto, sendo esta indeterminada, ou seja, a cada ponto imagem correspondem infinitos pontos objeto, todos aqueles que se encontrem sobre o raio projetivo que passa pelo centro de projeção e pelo ponto imagem.

Para se determinar as coordenadas-objeto de um ponto é necessário utilizar mais do que uma fotografia onde esse ponto apareça. Por exemplo, com duas fotografias pode-se formular quatro equações a três incógnitas (X, Y, Z) (assumindo que se conhecem os restantes parâmetros), existindo, contudo, redundância nos resultados. A precisão das coordenadas (X, Y) de um dado objeto, restituído segundo as equações de colinearidade, será dada em função da precisão de todos os parâmetros e variáveis dessas equações.

As equações de colinearidade não são lineares e uma aproximação linear é geralmente realizada para se tentar resolver qualquer uma das variáveis como incógnitas, através de um processo iterativo (Pereira 2005).

Algumas das vantagens de utilização deste método são a sua maior precisão, a facilidade de aperfeiçoar o modelo matemático (aumentando por exemplo, o número de correções adicionais devido a erros sistemáticos), a facilidade na introdução no cálculo de observações adicionais no objeto (distâncias entre pontos, ângulos, condições de paralelismo, etc.).

Os elementos da orientação externa obtidos pelo cálculo, podem ser introduzidos diretamente nos restituidores analógicos, analíticos e nas estações digitais para retificação das fotografias.

Como desvantagem considera-se que é o método que envolve maior número de cálculos. Sendo um problema não linear exige à entrada, valores aproximados para todas as incógnitas (obtidos normalmente por uma triangulação), não permitindo a utilização de restituidores analógicos na aquisição dos dados primários, uma vez que necessita das coordenadas fotográficas, medidas em aparelhos analíticos, digitais ou outros que as meçam (Pereira 2005). É sempre um problema tridimensional, não permitindo o cálculo separado das coordenadas planimétricas das altimétricas como faz o método de modelos independentes.

2.5 Aquisição de Dados na Fotogrametria

2.5.1 Tipos de Aquisição

De acordo com o tipo de necessidades apresentadas em cada uma das aplicações possíveis para a fotogrametria, são distinguidos os métodos e as formas de aquisição dos dados, podendo ser de origem terrestre ou aérea. De acordo com o objeto e com o resultado que se pretende obter é escolhida a melhor forma para se obter os dados.

Na fotogrametria terrestre, as fotografias são captadas em Terra em posições estacionárias a uma certa altura, onde a inclinação e outras especificações da câmara fotográfica são controladas. A aplicação da fotogrametria terrestre foi o método padrão para o mapeamento nos primeiros dias da cartografia, no entanto, foi substituída pela fotogrametria aérea, que representou um grande progresso para a técnica (Kaufmann & Ladstädter 2007). A fotogrametria aérea envolve a utilização de câmaras métricas e a elaboração de planos de voo e pode ser dividida em dois tipos, oblíquas e verticais. A diferença entre estes dois tipos de fotogrametria está na configuração como a captação dos dados é realizada. Na fotogrametria aérea oblíqua o objeto é visto de um determinado ângulo e, portanto, as fotografias são captadas para que pelo olho humano seja percebida a profundidade e definição da imagem. No caso da fotogrametria vertical, é produzida uma imagem predominantemente plana. A fotogrametria aérea face à terrestre tem mais vantagens quando se pretende analisar objetos de grandes dimensões, uma vez que tem a capacidade de atingir planos que por meio terrestre seriam inacessíveis.

No seguimento deste tema, surge o conceito de ortofoto, do grego *Orthós* (correto ou exato), uma representação fotográfica na qual todos os elementos apresentam a mesma escala, livre de erros e deformações. As ortofotos são produzidas mediante um conjunto de imagens aéreas que tenham sido corrigidas digitalmente para representar uma projeção ortogonal sem efeitos de perspetiva, pela qual é possível realizar medições exatas, ao contrário de uma fotografia aérea simples, que apresenta sempre deformações causadas pela perspetiva da câmara, a sua altitude ou pela velocidade com que a câmara fotográfica se move. Apesar da técnica terrestre ter muitas desvantagens em relação à técnica aérea, p.e., o mapeamento de áreas de grande porte não ser economicamente viável e a fraca precisão do levantamento horizontal é uma técnica que continua a ser utilizada para estudos locais, principalmente no âmbito da topografia.

2.5.2 Requisitos da Aquisição

A aquisição dos dados na fotogrametria requer especial atenção uma vez que é necessário que os dados sejam suficientes e possuam as características necessárias para o seu posterior processamento. De seguida estão referidos os principais cuidados a ter quando se faz um levantamento (Agisoft LLC 2011):

- O objeto alvo deve estar sempre no centro e preencher a maior parte da imagem. Deste modo, a maior parte dos *pixéis* da imagem são utilizados para fazer o processo de correspondência, que eventualmente resultará num modelo 3D mais detalhado;
- O cenário reveste-se de uma particular importância no ato de captar as fotografias. Se o objetivo é captar um único objeto deve ser evitado que o cenário e a superfície em que este está colocado seja monocromático;
- O objeto não deve ser movido durante o processo de captura e não deve haver pessoas em movimento em segundo plano. Os movimentos nas fotografias são uma das maiores razões para as distorções do modelo reconstruído final;
- Deve haver sobreposição de fotografias na ordem dos 60 a 80% de modo a que cada parte do objeto seja captada pelo menos três vezes em fotografias diferentes;
- Em média, deve-se apontar para o seguinte número mínimo de fotografias consoante o tamanho do objeto: 70 fotografias para um objeto de porte pequeno, 100 para um objeto de tamanho médio e entre 200 fotografias para edifícios e estruturas similares;
- Não é suficiente ter muitas fotografias se não houver sobreposição satisfatória entre elas. Quanto mais sobreposição houver, melhor será a qualidade e precisão do modelo 3D gerado (ver Figura 2.13);

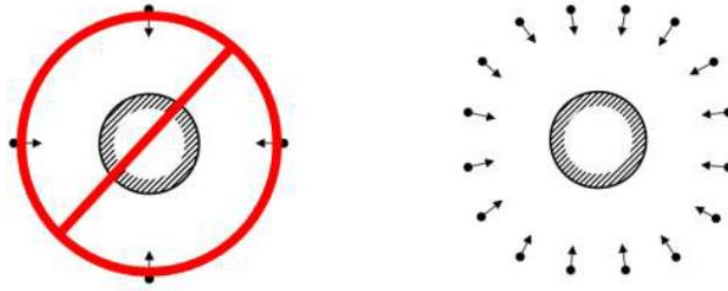


Figura 2.13: Requisitos de aquisição de dados: Sobreposição de fotografias (Agisoft LLC 2011)

- No caso de o objeto estar em espaços interiores, a captação das fotografias deve ser feita girando ao seu redor (Figura 2.14). Assim, mais ângulos serão captados contribuindo para o processo de cálculo que se pretende realizar;

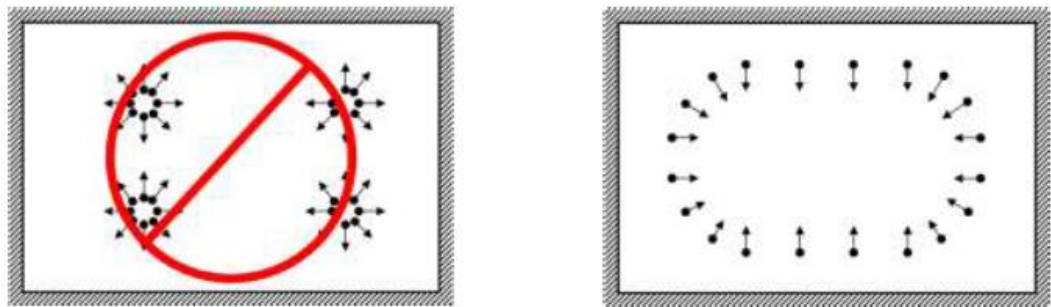


Figura 2.14: Requisitos de aquisição de dados em espaços interiores (Agisoft LLC 2011)

- Ao trabalhar no exterior, deve ser evitado capturar as fotografias a partir de um único ponto e de modo “panorâmico” (ver Figura 2.15). Deve sempre mover-se no ato da captação ligeiramente para o lado.



Figura 2.15: Requisitos de aquisição de dados no exterior (Agisoft LLC 2011)

Quando as fotografias não são georreferenciadas, i.e., não têm as coordenadas geradas quando são captadas, é necessário, para além dos procedimentos descritos anteriormente, utilizar um conjunto de pontos de controlo. Estes pontos são identificáveis nas fotografias, podendo ser ferramentas próprias, alvos ou até mesmo detalhes no próprio objeto, que irão permitir a relação entre o sistema de coordenadas da imagem com o sistema de coordenadas do objeto. Basicamente, são pontos de referência que são utilizados no processamento dos dados para aumentar a precisão dos levantamentos. Quanto maior o número de pontos de controlo, melhores serão os resultados esperados.

2.5.3 Equipamentos Necessários

1. Câmara Fotográfica

Uma vez que a fotogrametria resulta de um conjunto de processos que envolve fotografias, é claramente necessária uma câmara fotográfica. As câmaras fotográficas têm vindo a desenvolver-se continuamente e até há pouco tempo eram somente conhecidas as câmaras fotográficas analógicas. Câmaras estas desenvolvidas no Século XIX, onde o seu funcionamento depende de um processo químico para captar as imagens e utiliza um filme fotográfico, também designado por negativo, por guardar a imagem com as cores e luminosidade invertidas. O recurso a este tipo de câmaras fotográficas torna necessário revelar o filme para que se possam ver as fotografias (Oliveira 2012). Atualmente, é praticamente inexistente este tipo de câmaras no mercado por terem sido substituídas pelas câmaras fotográficas digitais.

A primeira câmara digital foi inventada em 1975 por Sasson (Kaufman et al. 2015). A principal diferença entre uma câmara analógica e uma câmara digital está no modo como a imagem é captada e gravada. Na câmara analógica a imagem é captada e gravada em filme e na câmara digital a imagem é captada por um sensor digital e gravada em memória digital.

As câmaras fotográficas digitais na gama profissional, atualmente apresentam uma alta resolução e qualidade da imagem, no entanto isto só é aplicável quando se trata de certos tamanhos de fotografias. No caso de as fotografias serem captadas com câmaras fotográficas analógicas estas podem ser ampliadas para qualquer formato que a sua resolução não estará comprometida como não é verificado nas fotografias obtidas por câmaras digitais.

A tecnologia apresenta cada vez mais, aparelhos com capacidade de captar fotografias, como no caso dos *smartphones* e dos *tablets*. Desde que possuam uma câmara fotográfica incorporada, estes podem executar levantamentos fotográficos e pôr em prática a fotogrametria. No entanto, atualmente a facilidade de portar uma boa câmara fotográfica digital permite obter melhores resultados.

Para explicar a diferença entre a utilização de câmaras fotográficas digitais com níveis de resolução diferentes podemos ver a Figura 2.16 onde estão dois modelos 3D gerados que posterior a este capítulo será explicada a sua geração.



(a)



(b)

Figura 2.16: (a) Modelo gerado com fotografias captadas com câmara compacta; (b) Modelo gerado com fotografias captadas com câmara DSLR;

Há claramente uma distinção no nível de qualidade do levantamento fotogramétrico de acordo com o tipo de câmara fotográfica que foi requerida. No primeiro caso o levantamento fotográfico foi feito com uma camara digital compacta e o segundo levantamento foi feito com uma DSLR. Diferente do que acontece com as DSLR, onde a imagem do visor é idêntica à que

passa através da lente até ao sensor, as câmaras compactas têm um visor paralelo, onde a imagem que é vista pelo utilizador não é a mesma – erro de paralaxe. As DSLR permitem obter fotografias de melhor resolução e qualidade e os resultados como foi verificado.

2. Tripé

O tripé é extremamente útil e necessário quando se pretende captar imagens por meio terrestre. O principal objetivo deste equipamento é estabilizar a câmara enquanto são tiradas as fotografias, possibilitando a redução do “ruído” nas imagens. Mesmo para as fotografias adquiridas por um *smartphone*, o uso de um tripé pode ser benéfico. Dentro da variedade de tripés que existem, os que permitem tirar fotografias panorâmicas a 360°, ou seja, que permitem girar a câmara a todo o seu redor, são os mais interessantes, uma vez que é possível captar mais informação.

3. Iluminação Artificial

A iluminação é um fator essencial para a obtenção de bons resultados. Uma iluminação brilhante, mas equilibrada, permite obter as características necessárias à imagem, de modo a perceber a sua profundidade. A falta desta característica é uma desvantagem para o processamento dos dados, uma vez que os detalhes se podem confundir no *software* de processamento.

A precisão, o elevado detalhe e a profundidade da imagem são propriedades que se pretendem alcançar no momento em que as fotografias são tiradas. Para isso, é necessária uma boa iluminação, para permitir baixar a sensibilidade fotográfica. Por sensibilidade fotográfica ou sensibilidade ISO é definida a sensibilidade no ato da captação de superfícies sensíveis à luz presente nas fotografias. Assim, obtém-se uma imagem menos “ruidosa” uma vez que a sensibilidade à luz é reduzida e, conseqüentemente permite que se consiga uma velocidade de obturador mais alta, i.e., maior velocidade na formação da imagem reduzindo o “borrão” provocado pelo movimento (Santos 2010).

Uma boa iluminação permite também a redução do efeito de contraste nos objetos brilhantes, sendo muito fácil trabalhar com as texturas. Uma vez que estas figuram em grande escala nas construções, torna-se fundamental reduzir o efeito de contraste. Em alternativa, ou na falta de

um equipamento de iluminação, poderão ser alcançados os resultados pretendidos facilmente ao ar livre num dia nublado, em que não hajam sombras nas áreas onde se encontra o objeto em estudo. Desta forma, a iluminação será plana e uniforme e não tem a necessidade de equipamentos adicionais. Outra opção à falta de equipamentos próprios de iluminação pode ser o uso de algo branco ou refletor de forma a que deixem de existir sombras indesejadas no objeto.

4. Drones

A fotogrametria passa por um conjunto de evoluções históricas que revolucionaram o seu desenvolvimento, nomeadamente a obtenção dos dados por meios aéreos. Atualmente, não só é possível fazer os levantamentos por meios aéreos convencionais, como também se podem fazer por meios aéreos não tripulados, designados por *drones*, que possuem uma câmara fotográfica incorporada.

Estes equipamentos podem ser controlados remotamente ou podem voar autonomamente através de planos de voo controlados segundo o GPS. O uso destes equipamentos tem tido um forte crescimento. Originalmente utilizados pelos militares, hoje em dia também são empregues nas mais variadas áreas, incluindo na fotogrametria.

Existem vários tipos de *drones* no mercado. No entanto, os que se direcionam para a prática desta técnica devem ser portadores de características específicas, nomeadamente: transportável (peso relativamente baixo do aparelho e baterias), ter um sistema GPS, possuir câmara fotográfica ou conseguir suportar o acoplamento de uma. Por terem um tamanho e peso reduzido, estes aparelhos representam uma menor ameaça real em caso de avaria. No entanto, devido à precisão necessária, a suscetibilidade ao vento destes aparelhos é muito relevante. Com um custo razoável e rápidos de manobrar, estes equipamentos obtêm resultados satisfatórios e por isso são uma mais-valia nas aplicações da fotogrametria (Eisenbeiß et al. 2009).

Para esta dissertação foi utilizado um *Phantom 3 Professional*®, um equipamento provido de uma *Gimbal*®, que é um suporte oscilante que permite a rotação de uma câmara sobre um único eixo, e por isso as imagens foram sempre captadas na horizontal, livre da ocorrência de distorções (Figura 2.17).



Figura 2.17: *Phantom 3 Professional® com a Gimbal® e câmara fotográfica de 12 MP*

5. Medidor de Distâncias

Graças à capacidade que o sistema aéreo utilizado na fotogrametria tem de captar fotografias com coordenadas geográficas o modelo processado resulta escalado. Contudo, deve ser introduzida no sistema informação adicional sobre certas medidas que irão confirmar esta escala. Por isso é necessário um equipamento de medição adequado à situação em questão. Pode ser utilizada uma simples fita métrica ou um medidor de distâncias digital a laser como o da Figura 2.18 que foi o requisitado para o levantamento nesta dissertação.



Figura 2.18: *Medidor de distâncias a laser*

2.6 Imagem Digital

A imagem digital é a representação visual e descritiva de uma imagem bidimensional contínua através de um processo de amostragem designado por digitalização. A imagem que passa por este processo é produzida através de uma representação seletiva de um conjunto de pontos, designados por *pixéis* (Valença 2011).

O aparecimento da imagem digital está diretamente relacionado com o desenvolvimento do computador digital e das linguagens de programação dada a capacidade de armazenamento e

do cálculo que estas exigem. Em 1957, surgiu a primeira imagem digital por *Russek Kirsch*, no NBS, agora conhecido como NIST (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia). Progressivamente foi expandindo noutras áreas, como é o caso da medicina, até que se tornou num formato popular e fundamental. Atualmente tem as mais variadas utilidades no nosso dia-a-dia (Cichonski et al. 2012).

Existem diferentes classes e tipos de imagem digital que são definidos de acordo com o seu formato. A classe da imagem está diretamente relacionada com a quantidade de *bits* (dígito binário) com que é guardada e o intervalo de *bytes* (conjunto de 8 bits) de por elemento em que se divide. Uma imagem pode ser representada em formato digital numa variedade de formas. No seu nível mais básico, existem duas formas de a classificar: *raster* - também conhecido como *bitmap* - e vetorial. Uma imagem *raster* é uma representação cujo processo de codificação digital consiste na divisão uniforme do plano da imagem numa grelha ou matriz finita de células que são os *pixéis*. O processo de representação da imagem vetorial assenta na utilização de uma série de elementos geométricos e comandos de desenho, denominados vetores. Paralelamente a estas duas categorias centrais de imagem digital definidas a partir da codificação de uma imagem bidimensional, deve-se ainda classificar como imagem digital toda a imagem tridimensional gerada por computador, através da modelação de uma rede que é posteriormente colorida e texturizada.

Independentemente da resolução a que são produzidas as imagens *raster* e as imagens vetoriais, as imagens *raster* apresentam como grandes vantagens a velocidade de apresentação e a elevada qualidade. No entanto, a dimensão dos ficheiros que geram e o conseqüente espaço de armazenamento que exigem são algumas das desvantagens quando comparadas com as imagens vetoriais, sendo as últimas mais adequadas a trabalhos de natureza gráfica (Davis 2000).

2.7 Técnicas de Processamento de Imagem Digital

2.6.1 Transformação e Filtros

Na imagem digital existem técnicas de processamento com o intuito de corrigir, ou pelo menos minimizar, as distorções geométricas e radiométricas presentes na imagem. O objetivo está no melhoramento da perceção de todos os dados considerados importantes. Estas técnicas passam por transformações ou filtros aplicados na imagem digital, que são baseados na alteração do

histograma da imagem ou alteração da intensidade dos *pixéis*. No primeiro caso, existe uma função estatística da imagem que calcula quantos *pixéis* existem em cada nível de tonalidade. Muitas operações pontuais usam o histograma como parâmetro de decisão para fornecer resultados diferentes para o *pixel* da imagem processada (Scuri 2002). Este tipo de operações permite, por exemplo, aumentar o contraste da imagem, realçando os objetos existentes. No segundo caso, à imagem é aplicado um determinado fator alterando uniformemente as suas intensidades. Por exemplo, o contraste da imagem de saída que diminui (Valença 2011).

Como operações de pós-processamento existe, por exemplo, a seleção de objetos com características pré-definidas. Nesse sentido, surge a aplicação de técnicas de morfologia matemática que se descreve a seguir.

2.6.2 Morfologia Matemática

A morfologia matemática (MM) aplicada a imagens digitais é caracterizada por um conjunto de operações nas quais se modificam as estruturas espaciais de um objeto numa imagem, para que, apenas sejam extraídas as componentes úteis na sua representação e descrição (Santos et al. 1998). As operações morfológicas podem ser sobre as imagens binárias ou sobre imagens coloridas ou em tons de cinza. As do tipo binárias são definidas em imagens somente com *pixéis* pretos e brancos. Um objeto é considerado um conjunto matemático de *pixéis* pretos, onde cada *pixel* é identificado pelos seus índices de linha e coluna sendo chamado de um ponto no espaço bidimensional. As operações morfológicas sobre imagens coloridas ou em tons de cinza não implica a retirada ou inclusão de um *pixel*, mas sim na modificação parcial de seu valor.

A aplicação das operações de MM requer, muitas vezes, a utilização de elementos estruturantes onde se pode definir uma máscara, de geometria variada, que percorre a imagem e realiza operações sobre os *pixéis* contidos nesse elemento. Sobre a MM em imagens binárias, as transformações mais conhecidas são as seguintes (Valença 2006):

1. União de *pixéis* próximos

O objetivo é unir *pixéis* que se encontram próximos. Considerando o exemplo da Figura 2.19, se o objetivo for unir *pixéis* que estejam alinhados com uma determinada direção θ da Figura 2.19 (a), pode se utilizar um dos elementos estruturantes da Figura 2.19 (b)-(e) para unir *pixéis* pertencentes a uma reta vertical, horizontal, a 45° ou a -45° , respetivamente. A definição do

elemento estruturante implica o conhecimento, além da inclinação θ , do seu comprimento l (número de *pixéis*). A operação de MM a utilizar neste caso seria a *Dilatação*;

2. Eliminação de *pixéis* vizinhos

O objetivo é eliminar os *pixéis* que não cumpram um dado padrão, ou seja, que não satisfaçam os requisitos do elemento estruturante definido. Por exemplo, com o objetivo de eliminar conjuntos de *pixéis* que possuam uma determinada direção θ , pode se utilizar um elemento estruturante linear com outras direções por exemplo, $90^\circ + \theta$. A operação de MM a utilizar neste caso seria a *Erosão*;

3. Supressão de conjuntos de *pixéis*

Esta operação tem como objetivo eliminar conjuntos de *pixéis* isolados, que representem pequenas descontinuidades na imagem consideradas ruído. Esta operação implica a definição do número limite de *pixéis* (np) que compoñam o conjunto a eliminar (Figura 2.20);

4. Preenchimento ou eliminação de vazios

Esta operação tem como objetivo preencher vazios existentes no interior das descontinuidades. O resultado, exemplificado na Figura 2.20, permite assinalar a descontinuidade de forma mais evidente, sem, contudo, alterar as suas fronteiras exteriores.

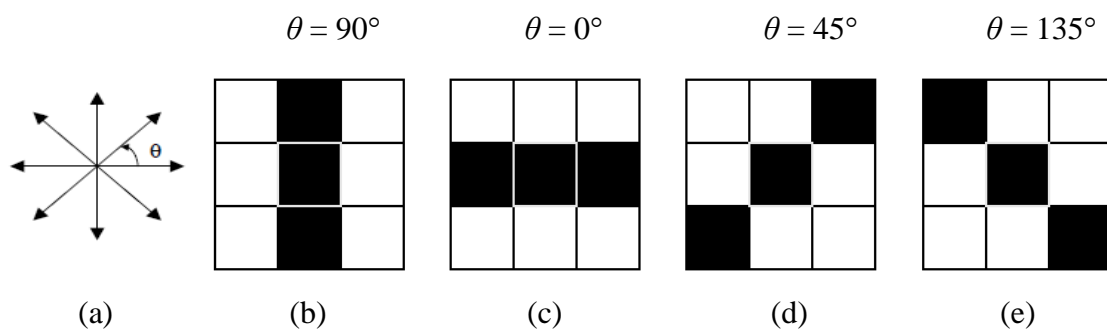


Figura 2.19: Elemento estruturante linear de comprimento $l = 3$ *pixéis*: (a) possíveis direções para o elemento estruturante; (b) 90° ; (c) 0° ; (d) 45° ; (e) 135° ;

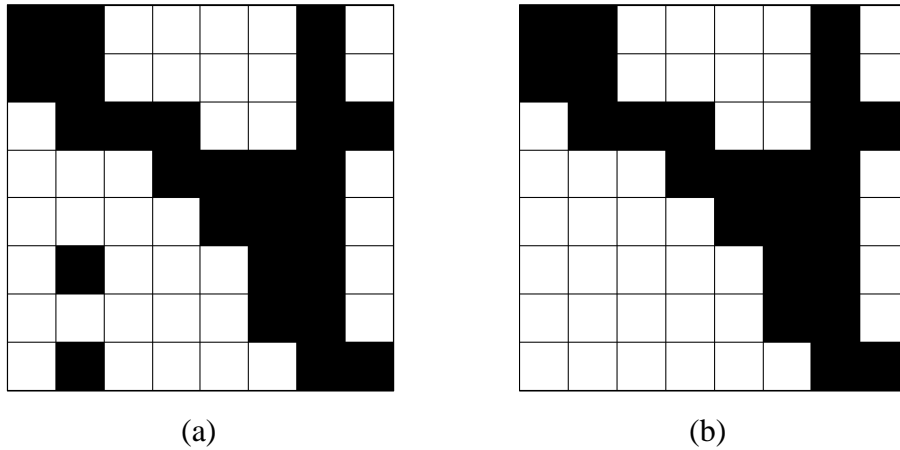


Figura 2.20: Eliminar pixéis isolados, $np \leq 10$ pixéis: (a) antes; (b) depois;

As operações utilizadas na MM podem resultar da combinação das transformações de *Dilatação* e *Erosão*, que permitem aplicar transformações de *Abertura*, *Fecho* e *Hit-or-Miss transformation*:

Dilatação e Erosão

Em geral a dilatação expande a região de um elemento e a erosão reduz a região do mesmo elemento. O resultado dependerá do *kernel* (componente central do sistema operativo), que é o elemento que irá percorrer os *pixéis* da imagem, realizando operações conjunto. No caso da erosão, o *kernel* deve estar inteiramente contido no elemento da imagem e a dilatação basta ter um ponto do *kernel* contido no elemento da imagem;

Abertura

Remove completamente regiões de um objeto que não conseguem conter o elemento estruturante. Como consequência, suaviza os contornos de objetos, interrompe ligações finas e remove saliências finas;

Fecho

Tal como a *Abertura*, tende a suavizar os contornos dos objetos, unindo, habitualmente, as ligações. Normalmente, preenche vazios inferiores ao elemento estruturante;

Hit-or-Miss transformation

É utilizada para identificar configurações específicas de *pixéis*, como os *pixéis* finais de segmentos de reta.

2.8 Ferramentas de Processamento de Dados

A fotogrametria tem demonstrado ser uma técnica de interesse para várias áreas, sendo notório o seu constante desenvolvimento e investimento a nível computacional, refletindo-se pela existência no mercado vários *softwares*. Para além dos *softwares* de fotogrametria, neste capítulo são apresentados outros *softwares* e aplicações que permitem, de alguma forma, a interoperabilidade dos resultados da fotogrametria, no sentido de analisar as potencialidades do método discutido nesta dissertação.

2.8.1 *Softwares* de Fotogrametria

O cérebro humano tem a perceção de profundidade porque compara as diferentes imagens captadas pelos olhos. Se alternativamente cada um dos olhos forem tapados, os objetos observados parecem variar. Este fenómeno designa-se por estereoscopia e consiste na perceção da tridimensionalidade dos objetos através da análise de duas imagens obtidas em pontos diferentes (Grussenmeyer & Khalil 2008). O cérebro também usa essa informação para calcular subconscientemente o quão longe os objetos estão do observador. De um modo semelhante funcionam os *softwares* de fotogrametria, que mapeiam e reconstroem a forma de um objeto por comparação de duas ou mais fotografias. Com algum tempo de tratamento, o que costumava ser bastante moroso e feito num local apropriado, com mão-de-obra especializada, atualmente pode ser realizado com o apoio destes *softwares*.

O *Agisoft's Photoscan®* foi o *software* de fotogrametria selecionado neste trabalho. O custo deste juntamente com o equipamento de aquisição de dados para a produção de um modelo tridimensional é várias vezes mais baixo que o valor de um *laserscanning* e respetivo *software*. Contudo, as diferenças da precisão alcançada são assinaláveis se for pretendido uma precisão significativa no levantamento. A qualidade dos resultados obtidos por este *software* está relacionada com a quantidade e qualidade das fotografias. A qualidade do computador influencia o tempo de processamento, mais especificamente com a capacidade de memória,

uma vez que são processadas muitas imagens (idealmente) com alta resolução (Agisoft LLC 2011). O *software* compara todas as características das fotografias e gera um modelo 3D em forma de nuvem de pontos ou malha tridimensional.

2.8.2 *Softwares* de Geomática

A necessidade de criar modelos sólidos a partir de uma nuvem de pontos torna a aplicação de *softwares* restrita.

Os *softwares* de geomática são especializados em recolha, armazenamento e processamento de informação espacialmente referenciada, daí se tornarem uma ferramenta extremamente útil no que diz respeito ao manuseamento dos pontos de nuvens gerados através da técnica fotogramétrica.

O *Geomagic Design X*® é um *software* de geomática que permite de forma eficiente e precisa digitalizar, projetar e produzir modelos tridimensionais de elevada qualidade. Este *software* abrange discussões completas para designers, engenheiros e empreendedores na projeção de modelos em 3D de forma rápida e precisa. Estas soluções oferecem uma gama de opções, incluindo as aplicações de digitalização, design, impressão e inspeção em 3D.

2.8.3 *Softwares* do Tipo CAD

Os *softwares* do tipo CAD são *softwares* que permitem desenhar com o auxílio de um computador. Por exemplo, o *AutoCAD*® é um dos *softwares* mais antigos comercializado pela *Autodesk*® e é principalmente utilizado para a elaboração de desenhos técnicos em 2D e 3D. Para além de desenhos técnicos, este *software* dispõe de vários recursos de visualização e em vários formatos, sendo amplamente utilizado em vários ramos de outras indústrias.

2.8.4 *Softwares* de Análise Numérica

Os *softwares* de análise numérica permitem encontrar soluções de modelação matemática que se aproximam dos valores exatos com um número mínimo de operações elementares em modelos geométricos. O *DIANA (DISplacement ANALyzer)* é um extenso *software* dedicado a esta análise na área da Engenharia Civil e Geotecnia. É um *software* conhecido mundialmente

e usado ativamente por instituições de investigação e por empresas de consultoria no campo da análise numérica de estruturas.

Este *software* é portador de um pré/pós-processador designado por *FX + for DIANA®* que permite ao utilizador construir ou importar modelos geométricos em formato CAD. De tal forma, é possível importar o modelo geométrico gerado pela fotogrametria de forma a permitir a sua modelação numérica.

Este pré-processador permite gerar facilmente malhas ideais para modelos complexos em qualquer configuração particular desde que o computador tenha boas capacidade de memória e processamento. No ambiente de pós-processamento, além das várias funções de visualização, o usuário pode extrair os resultados da análise numérica para uma tabela compatível em Excel.

2.8.5 *Softwares* de Rendering 3D

Este tipo de *softwares* não se compara aos de modelação 3D, que envolvem a criação de modelos tridimensionais. São *softwares* que permitem criar visualizações ou animações de acordo com a intenção do utilizador. Estes softwares servem essencialmente para ajudar na visualização final, dado que uma boa apresentação é uma das melhores formas de envolver um cliente/utilizador final.

Uma forma de promover conteúdos em formato 3D e com o intuito de facilmente chegar ao público geral é através de plataformas *on-line*. O *Sketchfab®* é um *site* usado para exibir e partilhar conteúdo 3D que tem a capacidade de importar nuvens de pontos em formato “aberto”. Esta plataforma fornece um visualizador baseado na tecnologia *WebGL®*, que permite visualizar modelos 3D em qualquer *webpage*.

2.8.6 *Apps*

As *Apps* são aplicações para os telemóveis ou *tablets*. Este tipo de ferramentas, atualmente muito utilizadas no quotidiano, têm vindo a desenvolver-se cada vez mais e são, por isso, consideradas uma revolução no mundo da tecnologia.

Dentro do mercado já existem *Apps* que visam o processamento de dados através da fotogrametria. A capacidade de captar fotografias com resolução e qualidade de imagem cada

vez mais qualificadas através de um *smartphone* torna todo este processo possível. Criar modelos 3D através deste tipo de dispositivo tornou-se viral e cada vez mais existem empresas especializadas a trabalhar nesta área. Por exemplo, a *Autodesk®* tem o *123D Catch®* que é atualmente uma das *Apps* mais desenvolvidas para a fotogrametria (também existem um *software* com a mesma designação).

O conceito de criar modelos 3D através de um *smartphone*, a possibilidade de explorar a imagem e a interação com o objeto torna esta *App* uma novidade de fácil acesso e muito atrativa.

O *123D Catch®* é operacional com os vários sistemas operativos e é gratuito o que não substitui, claramente, o processo de fotogrametria digital tradicional para trabalhos profissionais. Contudo, é uma boa opção quando existe curiosidade sobre a técnica de gerar um modelo 3D a partir de um *smartphone* ou *tablet* pessoal.

2.8.7 Interoperabilidade da Informação

A interoperabilidade é um termo cada vez mais popular atualmente e pode definir-se como a capacidade de dois ou mais sistemas trocarem dados entre si. A sua falta pode ficar a dever-se pela diferença nos formatos, nos protocolos e nas linguagens de programação utilizadas em cada sistema.

O acesso a uma metodologia colaborativa avançada, materializada na centralização e compatibilização de todas as especialidades num só modelo, aumenta as exigências a nível dos requisitos de interoperabilidade. Um processo tão extenso e ramificado pressupõe que haja um meio adequado para trocar informação, sem corromper a integridade dos dados.

Em Engenharia Civil, a capacidade de trocar dados entre os sistemas representa um dos fatores que mais contribui para a falta de produtividade e para o não cumprimento dos planos de trabalho e dos orçamentos. Perante estas condicionantes, percebeu-se que seria necessária a criação de uma forma de garantir a correta troca de dados entre sistemas, surgindo os formatos “abertos”. Por formatos “abertos” designam-se os ficheiros em formatos que permitem a contínua troca de dados entre diferentes tipos de *softwares* sem perda de informação.

Como se pretende neste projeto aplicar-se diversificados *softwares* é imprescindível a utilização destes formatos de ficheiros para que não ocorram distorções de dados com a partilha entre eles. De acordo com a informação com que se está a lidar existem diferentes formatos “abertos” de acordo com o tipo de dados que se trata.

O mais conhecido formato “aberto” é o “IFC” que se destina a descrever os dados da indústria de construção Civil. É uma plataforma neutra, de especificação de formato aberto que não é controlada por um único fornecedor ou grupo de fornecedores. Surgiu para facilitar a interoperabilidade na indústria da arquitetura, engenharia e construção e atualmente já existem mesmo protocolos apoiados neste modelo.

Para o processamento de nuvens de pontos podemos operar com o formato “XYZ” ou “OBJ” por exemplo, para as malhas tridimensionais com “PLY”.

Para processar elementos geométricos pode-se operar com ficheiros do tipo “DFX”, “SAT” ou “IGES”. Estes últimos apesar de cumprirem o papel da transmissão de dados geométricos, verificou-se, ainda assim, que era algo frequente a perda ou a corrupção de dados o que levou à necessidade de ajustes manuais surgindo a criação de um formato standard de interoperabilidade para produtos industriais, o “STEP” que inclui vários domínios distintos, nomeadamente na indústria da construção (Steel et al. 2012).

2.9 Conclusões

A fotogrametria surgiu no Século XV e desde então sofre uma contante evolução na forma como é processada, na maneira como os dados são adquiridos e nos equipamentos que utiliza.

Como foi referido ao longo deste capítulo, a técnica fotogramétrica é entendida como uma ciência que determina a informação geométrica ou métrica de um determinado objeto/estrutura através da recolha de fotografias, em alternativa a levantamentos manuais que são bastante mais morosos e não são tão precisos.

Esta técnica é extremamente útil na área das Construções quando os objetos ou as estruturas são de difícil acesso e é necessária a informação de contorno e superfície para realizar levantamentos e/ou diagnósticos estruturais.

Com a massificação dos computadores pessoais e a evolução da fotografia digital, o estudo da fotogrametria tem vindo constantemente a desenvolver-se. A facilidade com que hoje em dia se pode fazer um levantamento fotográfico, devido ao vasto leque de equipamentos e ferramentas disponíveis no mercado, torna a fotogrametria uma técnica de fácil acesso e sem a necessidade de alta especialização em mão-de-obra.

Genericamente, a fotogrametria consiste na transformação de imagens planas em imagens tridimensionais, o que só é possível com o auxílio de modelos matemáticos, onde é abordada a forma como se unem os pontos de várias fotografias sobrepostas, de forma a obter-se uma nuvem de pontos.

No mercado existem vários *softwares* capazes processar dados em fotogrametria, e são referidos neste capítulo aqueles que foram utilizados para as aplicações referidas em outro capítulo que se segue.

A fotogrametria está cada vez mais perto de obter resultados tão precisos como os que são obtidos por um *laserscanning*, outra técnica de levantamento, conhecida por obter resultados altamente precisos.

O *laserscanning* pelos equipamentos e recursos que requer confere melhor qualidade na monitorização das estruturas, no entanto em comparação com a fotogrametria a sua utilização não é destacada pelo facto do seu rácio qualidade/custo envolvido não ser justificativo.

A técnica fotogramétrica está a envolver cada vez mais equipamentos sofisticados e técnicas de aquisição de dados que prometem obter resultados para além dos que já são obtidos, ainda mais precisos.

3. CASOS DE ESTUDO

3.1 Introdução

Para melhor interiorizar a técnica fotogramétrica serão abordados diferentes casos de estudo que permitem relacionar diferentes tipos de objetos, com diferente relação de pormenor e ferramentas utilizadas.

Primeiramente será alvo de estudo um objeto de porte pequeno. De forma pormenorizada, este objeto é a primeira aplicação “prática” de fotogrametria para a modelação 3D a partir de imagens. Este estudo serve de “intermediário” entre os conceitos sobre a fotogrametria e as suas aplicações a um conjunto de aplicações - casos de estudo. Com ela pretende-se tirar conclusões importantes para posteriormente efetuar os levantamentos dos casos de maior porte aplicados no capítulo seguinte.

Em relação aos casos de estudo das construções/estruturas reais, ainda neste capítulo serão mencionados as suas características principais e os propósitos que levaram ao seu levantamento e diagnóstico.

3.2 Caso de estudo: Objeto simples

3.2.1 Descrição do Objeto

Para melhor dar a conhecer a aplicação da fotogrametria no levantamento de objetos, optou-se por analisar em primeiro lugar um objeto simples. Este estudo permitiu obter uma noção básica da técnica fotogramétrica, o que veio facilitar a sua posterior aplicação nos casos de estudo mais complexos.

Antes da seleção deste objeto foi realizada uma pesquisa que levou a excluir, desde logo, opções de objetos do tipo:

- Refletores;
- Brilhantes;
- Transparentes;
- De difícil geometria.

Os objetos com características referidas nos pontos anteriores iriam gerar uma malha extremamente mal detalhada ou simplesmente não a iam gerar, como é o caso dos objetos transparentes. Isto porque o processamento que a fotogrametria envolve precisa de encontrar pontos de referência e se os objetos em estudo tiverem uma geometria com estas características os dados irão ser confundidos pelo *software* de processamento.

Dada esta informação, selecionou-se um objeto que é uma caixa em madeira (Figura 3.1) com uma base $x \times y$ (10×15 cm) e altura h (8.5cm). Esta caixa apresenta uma geometria plana nas faces e as arestas superiores arredondadas. Tem também uma parte com uma geometria irregular na parte frontal que faz parte do fecho da caixa. Este objeto apresenta três importantes vertentes na análise da geometria que podem ser propostas em fotogrametria – *plana, curva ou irregular*.

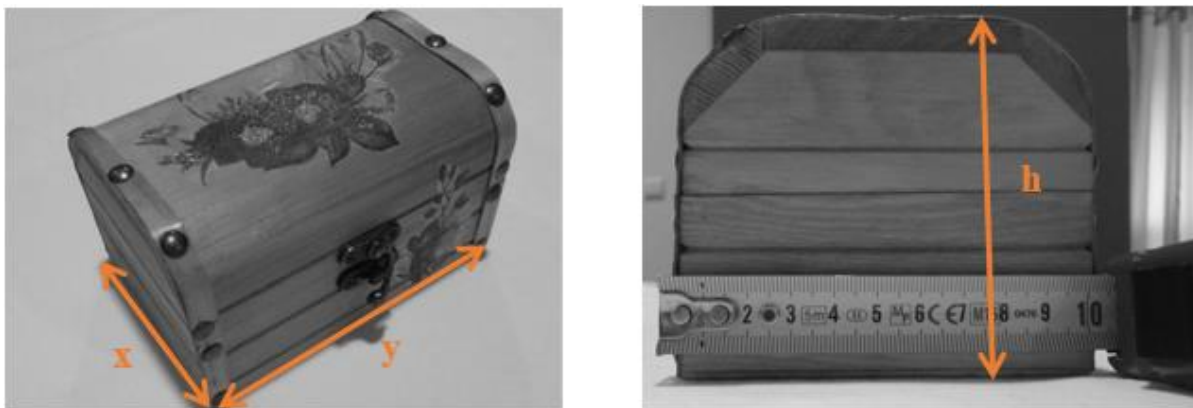


Figura 3.1: Objeto de estudo simples

3.2.2 Aquisição de Dados

Quando se pretende efetuar um levantamento de dados em fotogrametria devemos seguir alguns aspetos que são a base de um bom levantamento. Para a recolha dos dados da caixa de madeira foram tidos em conta os aspetos mais importantes, nomeadamente:

1. As condições de iluminação

Procurou-se captar as fotografias num espaço (o mais possível) livre de pontos indesejados e colocou-se o objeto sobre uma superfície base de cor neutra, de modo a potenciar o contraste entre essa base e o objeto de estudo evitando que estes se confundam. A iluminação suave e homogénea em todos os ângulos que cercavam o objeto foi outro aspeto tido em conta neste levantamento.

2. O equipamento utilizado

Poderia ter sido utilizada qualquer câmara fotográfica, mas evidentemente que, quanto maior for a qualidade deste equipamento, melhor resolução terão as fotografias. Recorreu-se a uma câmara mediana da SONY®, modelo DSC-W570 (25-125mm) com 16 MP de resolução. Uma vez que deve ser utilizado um baixo ISO para garantir que a imagem seja mais nítida optou-se por um ISO 400 (valor mínimo que a câmara permite).

Quando as fotografias são captadas por câmaras fotográficas deve-se recorrer ao uso de um tripé para evitar que as fotografias saiam tremidas. Como não houve a possibilidade de utilizar

este equipamento, a câmara fotográfica estava pousada na superfície e, à medida que eram tiradas as fotografias, a câmara ia sendo deslocada sempre à mesma altura.

3. As regras básicas de captura das fotografias

A forma como são captadas as fotografias é uma parte muito importante para conseguir um modelo ideal. Os aspetos mais importantes tidos em conta foram:

- (i) Manter um comprimento focal (d) o máximo possível contínuo em toda a envolvente do objeto (ver Figura 3.2 e Figura 3.3). Não existem valores exatos que definam esta distância, no entanto deve manter-se uma distância mínima de 5cm. Como neste caso era insuficiente esta distância mínima, pelas imagens não alcançarem o objeto no centro optou-se por uma distância focal de 20 cm;

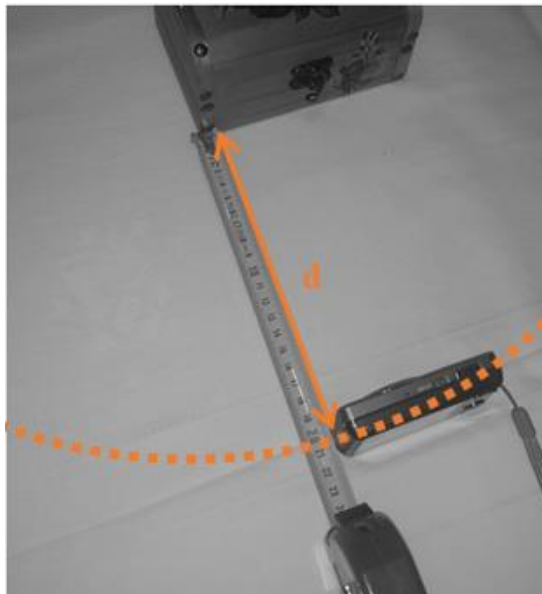


Figura 3.2: *Distância focal*



Figura 3.3: Posição da câmera fotográfica no momento de captação das fotografias

- (ii) O levantamento pode ser iniciado na parte inferior ou superior do objeto e progressivamente ir colocando a câmera na posição oposta à do objeto de modo a captar imagens de toda a sua envolvente mantendo o comprimento focal constante com a ajuda de uma fita métrica;
- (iii) Obter um número de fotografias proporcional ao tamanho da caixa de modo a que haja uma percentagem na ordem dos 60% de sobreposição das imagens.

3.2.3 Processamento dos Dados

Após a realização do levantamento dos dados necessários, segue-se a introdução dos mesmos no *software* de fotogrametria, *Agisoft PhotoScan*®. É importante ver as especificações que o *software* exige para o recurso computacional onde será realizado o processamento. O *Agisoft PhotoScan*® tem requisitos mínimos de acordo com o número de fotografias a serem processadas (ver Tabela 3.1), caso contrário o modelo poderá mesmo não ser gerado.

Tabela 3.1: Requisitos computacionais mínimos para gerar modelos no Agisoft PhotoScan®

Alinhamento de imagens (100 fotografias)	500 MB de memória
Construção de um modelo (100 fotografias)	Baixa qualidade – 25 MB
	Ultra qualidade – 6.4 GB
Construção de uma malha (1 milhão de faces)	Consumo de memória – 128 MB

Pela Tabela 3.1 é possível ter a percepção dos requisitos mínimos que o processamento de um modelo exige computacionalmente quando são utilizadas 100 fotografias. O mesmo número de fotografias de um objeto pode criar modelos de baixa e alta qualidade.

Para gerar o modelo 3D da caixa de madeira a partir das fotografias captadas com as especificações referidas anteriormente seguiu-se a sequência de passos no *Agisoft PhotoScan®*:

1. Importação de fotografias: foram carregadas as 103 fotografias na interface do *software*;
2. Alinhamento das fotografias: primeiro passo do processamento no *software*, em que todos os *pixels* das fotos são comparados e dessa forma é estimada a localização das imagens e da geometria em 3D;
3. Eliminação de pontos indesejados: este passo é importante para que o modelo gerado não contenha informação indesejada. Consiste na eliminação de pontos que não fazem parte do objeto, provenientes da envolvente onde estava colocado;
4. Criação de uma nuvem de pontos densa: após o alinhamento das fotografias (onde é criada uma fração da nuvem de pontos) é processada uma nuvem de pontos densa em que cada *pixel* correspondente terá a sua própria localização espacial (x, y, z);
5. Criação uma malha: neste passo, o *software* liga cada conjunto de três pontos adjacentes numa face triangular, que se combinam para produzir uma malha contínua sobre a superfície do modelo;
6. Criação da textura: no passo final, as imagens são combinadas num mapa de textura e envolvidas em torno da malha, resultando num modelo foto-realístico original.

A fim de melhorar o modelo final existem outras ferramentas no *software* para além destes passos básicos:

- a) Definir uma escala: caso as fotografias importadas não tenham as coordenadas geográficas o *software* não produz o modelo com uma escala conhecida. No entanto é possível fazê-lo manualmente, através da seleção de pontos que formam distâncias conhecidas. O *software* permite que sejam introduzidas estas distâncias originando um modelo 3D escalado;
- b) Exportar o modelo 3D: dado todo o procedimento anterior referido é possível exportar o modelo em diversos formatos de exibição ou mesmo a sua importação noutra *software*. Os formatos mais comuns são:
 - PDF 3D: é um formato interativo que é amplamente acessível, onde o modelo pode ser visto, manipulado e até mesmo medido usando o *Adobe Reader*®;
 - *Wavefront* (“OBJ”) e *Collada* (“DAE”): são os formatos de malha tridimensional mais conhecidos. Têm a facilidade de serem adicionados a outras plataformas de modelação;
 - *Pointcloud* (“PLY”): armazenam toda a informação espacial e têm a opção de análise secundária noutras ferramentas de geomática.

No decorrer deste processamento é importante referir que devem ser eliminadas as fotografias tremidas, uma vez que só irão confundir o *software* porque os pontos não estão bem definidos no espaço e deve-se seguir todas as regras de levantamento de fotografias, o que permite e facilita a criação de um modelo resultante “ideal”.

Caso não haja sobreposição suficiente das imagens, o *software* de forma automática elimina as fotografias que estão isoladas, resultando um modelo final com qualidade muito precária.

3.2.4 Modelo 3D

O modelo criado com os procedimentos e aspetos anteriores referidos pode ser visto pela Figura 3.4. Como primeiro caso prático é importante fazer uma análise aprofundada do modelo, de forma a reter o máximo de informação possível para posteriormente efetuar os levantamentos dos objetos mais complexos com o menor erro possível.



Figura 3.4: Modelo 3D do objeto de estudo simples

A Figura 3.3 mostra um modelo tridimensional da caixa de madeira. Nota-se que existe uma pequena porção de “área indesejada” (a cinza) em torno do objeto pelo levantamento não ter sido feito num local totalmente livre.

A parte da aresta superior da caixa de madeira está distinguida com uma cor esbranquiçada do resto do objeto. Isto deve-se pelo facto de ser uma zona brilhante, uma vez que a caixa é envernizada e em contacto com a iluminação utilizada resultou num brilho mais intenso naquela zona, o que veio a afetar a nitidez do modelo nesta parte.

Relativamente às particularidades da geometria que foram mencionadas na descrição do objeto, é possível afirmar que a fotogrametria trabalha melhor quando se trata de uma superfície totalmente plana. Quando a geometria do objeto é muito irregular, como na parte do fecho da caixa, o *software* não obtém uma resolução tão alta.

Apesar dos aspetos mencionados, o modelo resultou conforme o que era esperado. Uma vez que neste procedimento foi necessário colocar as distâncias manualmente no *software* para gerar um modelo escalado existe sempre uma pequena percentagem de erro que é associada a

este passo. Quando as fotografias já incluem as suas coordenadas (têm de ser obtidas com apoio de um GPS) os modelos têm menos erro associado à sua criação.

A título de interesse nos possíveis resultados e para futura comparação entre dois modelos do mesmo objeto com dados distintos, fez-se outro processamento de fotografias. Procedeu-se à comparação entre dois modelos do mesmo objeto nas mesmas condições, mas com um número de fotografias inferior (34 fotografias). O modelo gerado está representado na Figura 3.5. O objetivo deste procedimento está na comparação entre os resultados de qualidade e resolução final entre dois modelos quando se usam mais e menos fotografias. A partir das fotografias do modelo principal foram selecionadas algumas em toda a sua envolvente e introduzidas no *software*, aplicando todos os passos de processamento como no primeiro modelo.



Figura 3.5: Modelo 3D com reduzido número de fotografias

Após a observação das Figuras 3.3 e 3.4 é clara a distinção da qualidade entre os dois modelos criados. O modelo gerado com mais fotografias é visivelmente um modelo mais preciso, com toda a informação de superfície e contorno definida. No modelo que foi gerado com o número de fotografias inferior é perceptível a falta de informação na superfície superior. Como não havia sobreposição de fotografias suficiente da parte superior do objeto, o *software* eliminou essa informação de forma automática no alinhamento das fotografias, daí o modelo apresentar aquele orifício na parte superior.

Na Tabela 3.2 estão mencionadas as características do processamento de cada um dos modelos gerados extraídas do *software* fotogramétrico.

Tabela 3.2: Características dos modelos gerados no Agisoft PhotoScan®

	Modelo gerado c/ 103 fotos	Modelo gerado c/ 34 fotos
Fotografias	103	34
Imagens alinhadas	103	28
Nuvem de ponto dispersa²	12 298 pontos	3 396 pontos
Nuvem de ponto densa	17 699 952 pontos	8 803 930 pontos
Malha tridimensional³	3 152 031 faces	1 830 015 faces
	1 582 759 vértices	920 758 vértices
Tempo de processamento (64 GB de RAM)	14 horas e 20 min	4 horas e 50 min
Erro no modelo	0,125 mm	1,830 mm
	0,817 pix	0,773 pix

Pelos valores da tabela é possível tirar as seguintes conclusões:

- O número de pontos na nuvem de pontos está diretamente relacionado com qualidade e resolução do modelo tridimensional gerado. O mesmo objeto pode ter uma nuvem de pontos mais ou menos densa, consoante o número de fotografias que são utilizadas para a sua criação. Mais pontos na nuvem, melhor resolução do modelo 3D;
- Relativamente ao tempo de processamento, como já foi referido anteriormente, quanto mais completo for o levantamento mais tempo demora o processamento. Neste ponto, talvez esta situação seja uma desvantagem a apontar na técnica fotogramétrica. Embora se utilize um computador com capacidade de memória RAM muito elevada para serem obtidos bons resultados esta tarefa torna-se um pouco morosa;
- O erro em milímetros está associado ao erro de correspondência entre as coordenadas da camara fonte (*drone*) e as coordenadas estipuladas pelo *software* de processamento das fotografias e o erro em pix está associado aos pontos de obstrução (indesejados) na nuvem de pontos.

² Nuvem de pontos gerada pelo alinhamento das imagens processadas.

³ Geração do modelo poligonal

Os modelos possuem um erro em pix semelhante porque este erro é relativo aos objetos indesejados associado ao ambiente em que o objeto foi levantado. Como ambos os levantamentos foram no mesmo lugar este erro é muito semelhante. Deveria ter-se escolhido um local menos propício ao aparecimento de objetos indesejados nas fotografias captadas.

3.2.5 Observações

A técnica desenvolvida é relativamente simples e muito eficaz para o propósito de modelar em 3D. Em primeiro lugar, todas as configurações da câmara devem estar de acordo com os requisitos necessários para se conseguir obter a imagem o mais nítida possível ao fazer o levantamento. Embora esta técnica seja muito eficaz é recomendável que seja feita uma análise e pré-seleção das fotografias após o seu levantamento para reduzir a entrada de informação indesejada no *software*.

Este processo é demorado quando se processam muitas fotografias e pode ser desaconselhado quando o objeto não é facilmente diferenciado do fundo onde está implantado.

O modelo 3D obtido da caixa permitiu obter uma melhor noção sobre aquilo que é a fotogrametria no “real”. Após este levantamento é possível concluir os aspetos mais e menos importantes na técnica da fotogrametria, o que vieram a influenciar em grande escala certos pontos abordados nos levantamentos dos casos de estudo mais complexos.

3.3 Casos de estudo: Construções reais

Após o primeiro contacto “prático” com a técnica da fotogrametria no caso de estudo simples segue-se recolha de informação dos objetos de estudo mais complexos e de construções reais.

No decorrer desta dissertação foram analisados diferentes tipos de estruturas onde foi aplicada a fotogrametria de modo a enriquecer o leque de resultados obtidos nas aplicações que irão ser alvo de estudo no próximo capítulo.

3.3.1 Caso de estudo: Paço dos Duques de Bragança

O primeiro levantamento de dados foi realizado no Paço dos Duques de Bragança (Figura 3.6), um Monumento Nacional da cidade de Guimarães, erguido no século XV por Afonso I de Bragança (Basto 2013). Este palácio reflete o gosto adquirido nas viagens pela Europa através do estilo borgonhês, ainda que o seu aspeto atual tenha sido recriado, de forma polémica, durante o Estado Novo.

Pela estrutura de grande dimensão e alto nível de detalhe e elementos construtivos que apresenta em toda a sua envolvente pretende-se aplicar este caso de estudo em duas aplicações com diferentes finalidades com recurso a fotogrametria, nomeadamente, a medição da deformação e o levantamento e análise histórica de elementos construtivos.

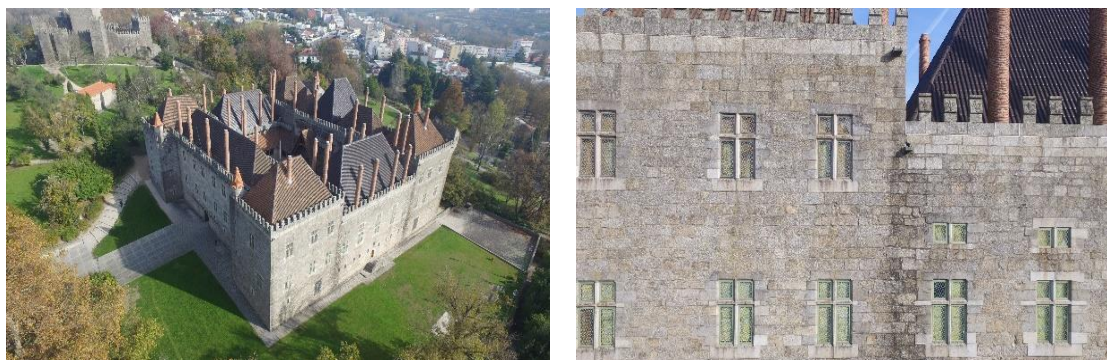


Figura 3.6: Paço dos Duques, em Guimarães

3.3.2 Caso de estudo: Mosteiro de Mancelos

O segundo levantamento de dados foi realizado no Mosteiro de Mancelos (Figura 3.7), perto da cidade de Amarante, classificado como Imóvel de Interesse Público desde 1934, onde integra o percurso turístico-cultural da Rota do Românico (D, Réau L Alcoba 1995). Os vestígios arquitetónicos subsistentes neste Mosteiro remetem-nos para o século XIII, sendo esta cronologia mais evidente no portal principal, mesmo que outros elementos que conferem monumentalidade à igreja, tenham sido modificados nos séculos posteriores à sua edificação.

Este mosteiro representa uma estrutura de grande porte e com elevada área de vegetação em praticamente toda a sua envolvente. Espera-se que este caso de estudo mostre como a fotogrametria ultrapassa barreiras no que diz respeito ao seu levantamento geométrico mesmo com as dificuldades de visualização apresentadas. Para além desta aplicação prevê-se que seja um caso de estudo na deteção automática de anomalias na fachada principal.



Figura 3.7: *Mosteiro de Mancelos, em Amarante*

3.3.3 Caso de estudo: Padrão do Salado

O terceiro levantamento foi realizado no Padrão do Salado (Figura 3.8), em Guimarães, um dos mais emblemáticos monumentos da praça principal do Centro Histórico da cidade. Foi erguido no século XIV por Afonso IV de Portugal para comemorar a vitória na Batalha de Salado, em 1340. Este monumento encontra-se classificado como Monumento Nacional desde 1910 (Ferrão, Afonso 2002).

Embora seja uma estrutura mais pequena do que as anteriores este monumento apresenta um maior nível de detalhe na sua constituição. Espera-se com recurso à técnica da fotogrametria ultrapassar as dificuldades de levantamento geométrico possibilitando desta forma a sua análise numérica.



Figura 3.8: *Padrão do Salado, em Guimarães*

3.3.4 Caso de estudo: Malha espacial de madeira

Por fim, foi realizado um levantamento de uma estrutura nada semelhante às anteriores, i.e. uma malha espacial em madeira (Figura 3.9), caracterizada por um conjunto de barras finas “entrelaçadas” entre si e que fez parte de uma dissertação de Barroso (2016), aluno da Universidade do Minho, com o intuito de perceber as deformações ocorridas na madeira pelo seu peso próprio ao fim de um determinado período de tempo. Esta estrutura apresenta uma geometria altamente irregular.

Para este caso foram feitos dois levantamentos de fotografias com diferentes ferramentas na hipótese de poder comparar os resultados obtidos com diferentes equipamentos.



Figura 3.9: Malha espacial em madeira

4. APLICAÇÕES DE FOTOGRAMETRIA

4.1 Introdução

Devido ao rápido desenvolvimento que se tem vindo a verificar da fotografia digital e do tratamento da imagem, é possível transformar métodos óticos em aplicações fotogramétricas de interesse na Engenharia Civil. É nestas aplicações que este capítulo se concentra.

São abordados os métodos e os meios utilizados nas aplicações, assim como os procedimentos envolvidos e as suas características/resultados.

Estão referidos nestas aplicações os levantamentos geométricos, a criação dos modelos numéricos, a medição de grandes deformações, o mapeamento e análise das anomalias, o levantamento histórico dos elementos construtivos e a criação de modelos virtuais para fins

turísticos. De igual modo, são referidas as limitações que surgiram no processamento da técnica fotogramétrica no decorrer do trabalho prático realizado.

4.2 Levantamentos Geométricos

O levantamento geométrico consiste na elaboração de desenhos (plantas, alçados e cortes) ou de um modelo tridimensional (3D) com a definição geométrica e posicionamento dos elementos arquitetónicos e estruturais de uma construção. O processo de levantamento geométrico é essencial nas situações onde esta informação não está disponível, quer pelo tipo de edifício (edifício histórico), quer nas situações onde este já não existe ou não está atualizado. No caso de construções históricas mais antigas, é frequente o levantamento geométrico não existir, ou encontrar-se desatualizado, consequência da falta de informação do projeto inicial e das alterações introduzidas e que, raramente, estão documentadas.

Os levantamentos geométricos são referidos em primeiro lugar dentro deste capítulo porque, de um modo geral, são a base ou o ponto de partida, de outras aplicações referidas posteriormente.

Para ilustrar os diversos procedimentos na realização de levantamentos geométricos, foram utilizados os seguintes casos de estudo: o Padrão do Salado, em Guimarães, e o Mosteiro de Mancelos em Amarante.

1. Levantamento de dados

Nesta fase foi realizado o levantamento dos dados, i.e. das fotografias e das medições consideradas importantes para o levantamento fotogramétrico.

Foi realizado com o apoio de um *drone*, *Phantom 3 Professional*®, provido de uma *Gimbal*® e de uma câmara fotográfica FC300X (3.61 mm) com capacidade de vídeo 4K e fotografia 12 MP (ver Figura 4.1).

O voo foi realizado em toda a envolvente das estruturas manualmente iniciando-se pela parte inferior das estruturas até ao cimo e de forma a obter o máximo de sobreposição das fotografias possível.

Após o levantamento das fotografias, foram feitas algumas medições com um medidor de distâncias para assegurar a escala do modelo gerado (ver Figura 4.2).

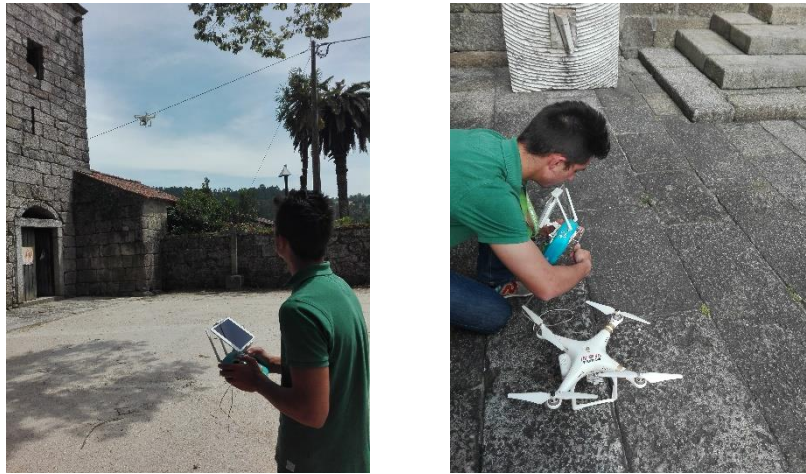


Figura 4.1: Levantamento de dados com o drone



(a)

(b)

Figura 4.2: (a) Medição de distâncias consideradas importantes; (b) Medidor de distâncias;

2. Geração da nuvem de pontos

Nesta fase foi utilizado o *software* de fotogrametria, *Agisoft PhotoScan®*, e o procedimento teve a seguinte ordenação:

1. Importação dos dados após a seleção das fotografias captadas pelo *drone*;

2. Alinhamento das fotografias. Neste ponto o *software* procura os pontos em comum nas fotografias para os fundir uns com os outros através da identificação dos parâmetros de calibração de cada imagem. Como resultado desta fusão, forma-se uma nuvem de pontos dispersos e estes pontos representam os resultados do alinhamento entre as fotografias que não irão ser novamente utilizados de forma direta no procedimento da construção do modelo 3D;
3. Criação de uma nuvem de pontos densa. Com base nas posições estimadas e extraídas das fotografias, o *software* gera uma nuvem de pontos mais densa e detalhada. Esta nuvem de pontos pode ser modificada e classificada antes de se prosseguir à exportação ou então à geração de um modelo de malha tridimensional;
4. Geração de uma malha tridimensional. O *software* reconstrói a superfície de uma malha poligonal 3D que representa o objeto com base na nuvem densa de pontos obtida na fase anterior. Neste caso, o método baseado na nuvem de pontos pode ser utilizado para a geração rápida das geometrias com base na nuvem de pontos dispersos. Em geral, existem dois algoritmos disponíveis no *software* que podem ser aplicados para a geração de malhas 3D (campo de altura para as superfícies planas, ou arbitrárias para cada tipo de objeto);
5. Edição da geometria da malha tridimensional. O *software* é capaz de efetuar algumas correções, tais como dizimação da malha que consiste na redução estratégica do número de polígonos que não influenciam nem põem em causa a representação dos detalhes, a remoção dos componentes isolados, o fecho de furos caso a sobreposição de imagens não seja necessária, entre outros;
6. Definição da textura do objeto. De forma automática, o *software* permite definir as texturas para o modelo gerado;
7. Exportação do modelo. O *Agisoft PhotoScan*® permite exportar a malha e editá-la com outro *software* caso seja o pretendido, pelo formato “PLY”.

O *software Agisoft PhotoScan®* permite exportar todas as informações dos modelos gerados decorrentes nesta fase onde são identificadas todas as características dos levantamentos como está a título de exemplo de seguida e que se encontra no anexo I e anexo II.

4.2.1 Procedimentos e resultados

Num levantamento geométrico é necessário recorrer a uma série de procedimentos, dos quais se podem distinguir quatro fases principais. A primeira fase consiste no levantamento dos dados, a segunda na geração de um modelo de nuvem de pontos densa através do conjunto de fotografias tiradas em torno do objeto alvo, a terceira na criação de um modelo sólido e por fim, a quarta que consiste na extração dos planos (plantas, alçados e cortes) a partir do modelo sólido.

Padrão do Salado

De seguida está representada uma tabela com a informação retirada do *software* considerada mais importante na fase inicial da criação do modelo tridimensional.

Tabela 4.1: Resumo do levantamento do Padrão do Salado

Número de Imagens	376
Imagens alinhadas	376
Resolução da Imagem	4000 × 2250
Altitude máxima de voo	10,9 m
Área de cobertura	239 m ²
Projeções	1.057.856
Tamanho do pixel	1,7 × 1,7 μm
Erro de projeção	0.912 pix
Erro total	1.93223 m

O erro em *pixéis* mostra erro de projeção médio para “pontos de obstrução” presentes em cada fotografia. Geralmente deve estar entre 0,6 – 1,0 pix. Se o valor de erro for superior a 1 pix, há provavelmente algum problema no modelo (Agisoft LLC 2011). Pelos valores da tabela anterior

é perceptível de que o modelo do Padrão do Salado tem um erro de projeção dentro dos valores definidos como aceitáveis.

Elevados erros em metros podem significar que o alinhamento relativo das imagens é bom, mas as coordenadas GPS não são precisas ou vice-versa ou ambos (Agisoft LLC 2011).

De seguida, na Figura 4.3, está uma representação da posição onde foram captadas as fotografias no levantamento.

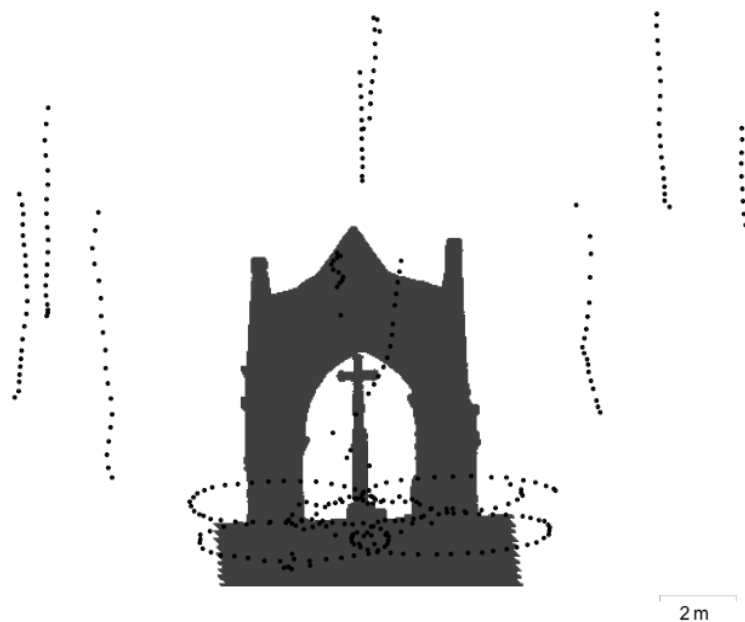


Figura 4.3: Posições do drone no levantamento das fotografias

Na Tabela 4.2 estão apresentadas as características dos principais passos da construção do modelo tridimensional final do Padrão do Salado (ver Figura 4.3).

Tabela 4.2: Reconstituição do modelo do Padrão do Salado

Passos na reconstituição	Características	Figura
Nuvem de pontos	108,003 pontos	4.4 (a)
Nuvem de pontos densa	10,390,054 pontos	4.4 (b)
Malha tridimensional	538,811 faces 270,140 vértices	4.4 (c)



Figura 4.4: (a) Nuvem de pontos; (b) Nuvem de pontos densa; (c) Malha tridimensional;

Mosteiro de Mancelos

De seguida está representada uma tabela com a informação retirada do *software* considerada mais importante na fase inicial da criação do modelo tridimensional.

Tabela 4.3: *Resumo dos dados do levantamento do Mosteiro de Mancelos*

Número de Imagens	564
Imagens alinhadas	564
Resolução da Imagem	4000 × 3000
Altitude máxima do voo	12.6 m
Área de cobertura	662 m ²
Projeções	1.385.629
Tamanho do pixel	1,56 × 1,56 μm
Erro de projeção	0.872 pix
Erro total	1.27207 m

Este modelo, em comparação com o Padrão do Salado, teve menor erro de projeção, o que significa que, apesar de ser uma construção muito maior, as fotografias do levantamento do Mosteiro não continham tantos pontos de obstrução (indesejados). Porque apesar da sua envolvente apresentar uma grande quantidade de área coberta por vegetação, o Parão do Salado não apresentava melhores condições de fundo porque estava rodeado por edificações e no momento

em que as fotografias foram captadas haviam muitas pessoas em movimento em torno da sua estrutura.

Na figura seguinte está um esquema representativo da posição da câmara quando foi efetuado o levantamento das fotografias do Mosteiro de Mancelos.

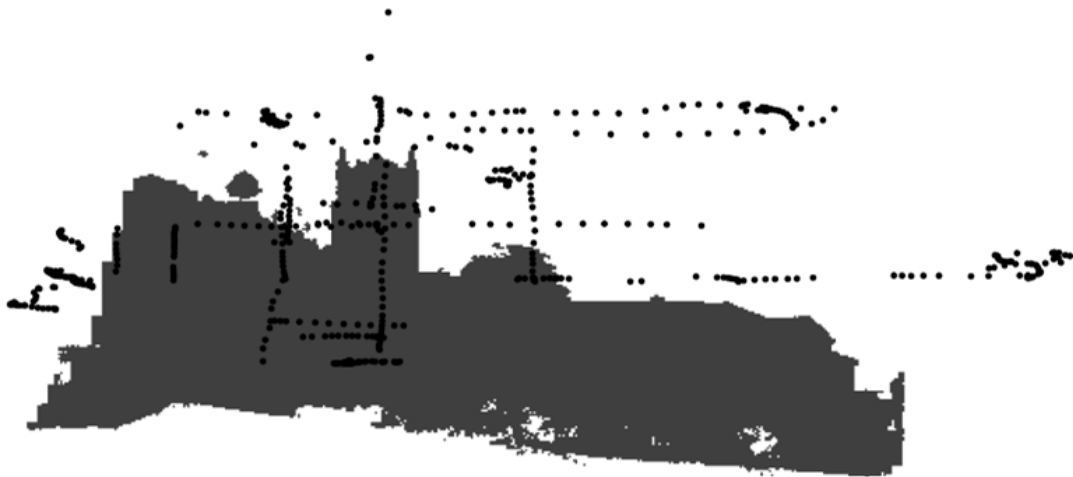


Figura 4.5: Posições da câmara fotográfica no levantamento do Mosteiro de Mancelos

Na Tabela 4.4 estão as características do modelo gerado no *software* de fotogrametria, *Agisoft PhotoScan*®.

Tabela 4.4: Características do modelo

	Características	Figura
Nuvem de pontos	234,518 pontos	4.6 (a)
Nuvem de pontos densa	63.872,819 pontos	4.6 (b)



(a)



(b)

Figura 4.6: (a) Nuvem de Pontos; (b) Nuvem de pontos densa;

3. Criação do modelo sólido

Nesta fase foi utilizado o *Geomagic Design X*® e a criação do modelo sólido teve a seguinte ordem:

1. Importação da malha tridimensional gerada pelo *Agisoft PhotoScan*®;
2. Criação de planos de referência (ver Figura 4.7(a) e 4.8(a)). Criação de planos virtuais a partir de três ou mais pontos selecionados. Não se trata de criar superfícies, mas sim estabelecer uma base para o próximo passo;
3. Definição dos contornos (ver Figura 4.7(b) e 4.8(b)). É a partir do plano de referência são criados contornos manual/automaticamente com o auxílio das ferramentas de esboço na posição do plano virtual. Este contorno será a base do sólido gerado;
4. Criação do sólido (ver Figura 4.7(c) e 4.8(c)). Consiste na extrusão do sólido a partir do esboço criado na fase anterior. É possível extrair o sólido a partir do esboço criado com a espessura que se pretende;
5. Tratamento do sólido final (ver Figura 4.7(d) e 4.8(c)). Muitas vezes, devido à complexidade dos modelos, é necessário analisar possíveis erros de extrusão e caso seja necessário é possível editar a geometria do sólido com as ferramentas que o *software* possui para tal;
6. Exportação. Após a finalização do modelo gerado, este pode ser exportado em vários formatos.

Padrão do Salado

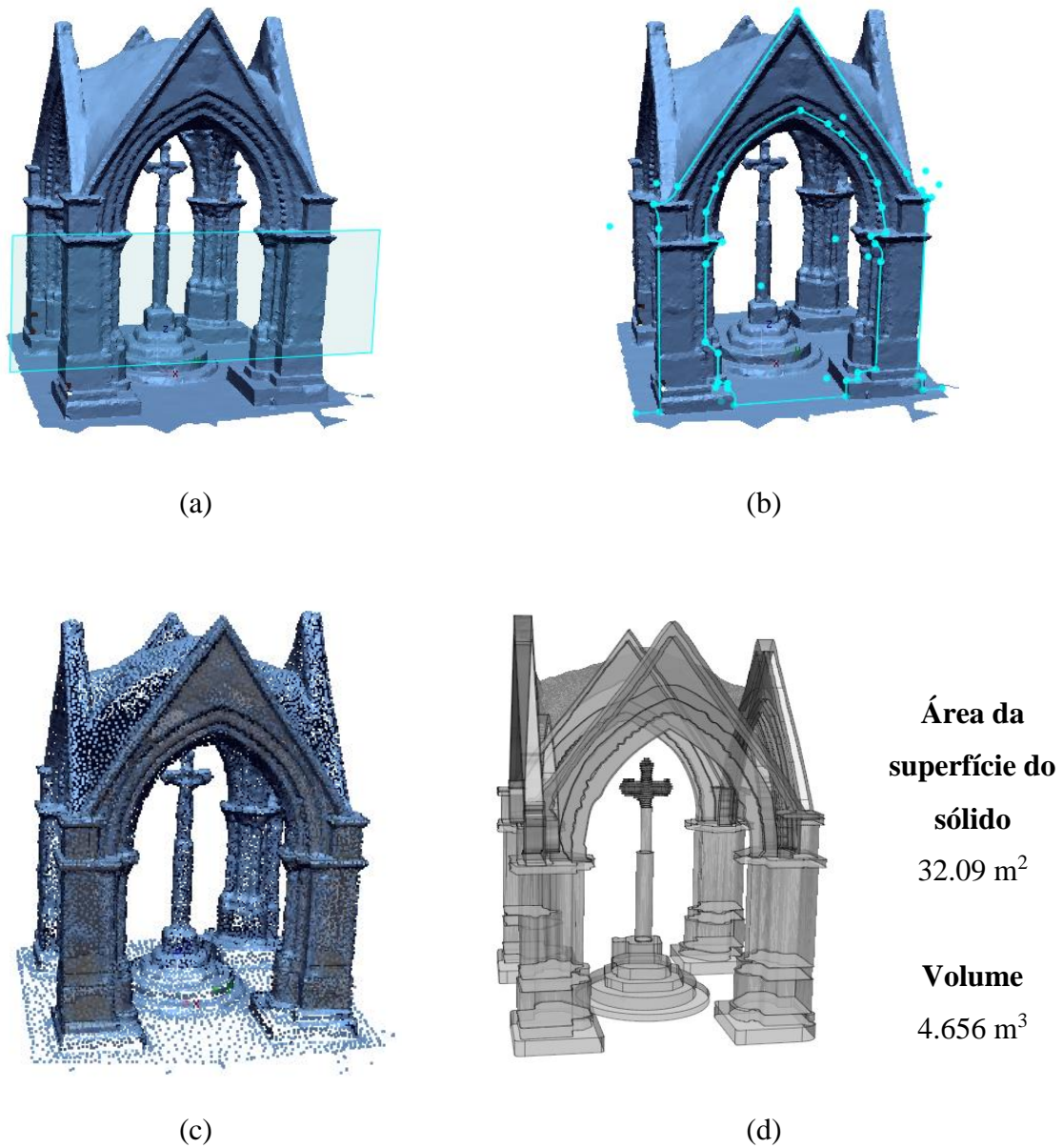


Figura 4.7: (a) Criação de planos de referência; (b) Criação de esboço; (c) Extrusão de sólidos; (d) Modelo sólido final;

O *Geomagic Design X*® tem uma ferramenta de medição onde é facultada a área das superfícies e o volume dos sólidos que são gerados de forma automática. O modelo geométrico do Padrão do Salado que foi criado tem um volume de 4,656 m³.

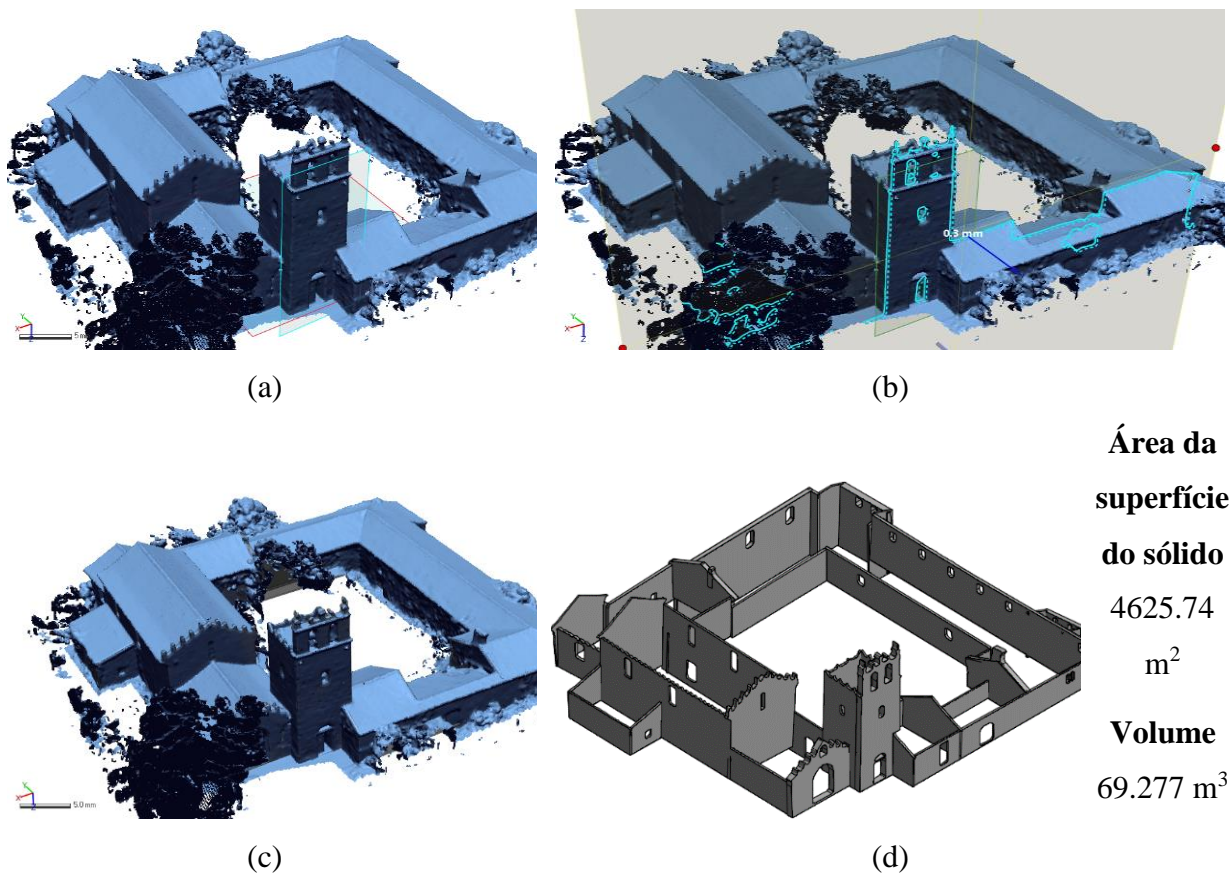
Mosteiro de Mancelos

Figura 4.8: (a) Criação de planos de referência; (b) Criação de esboço; (c) Extrusão de sólidos; (d) Modelo sólido final;

O modelo geométrico do Mosteiro de Mancelos criado tem um volume total de 69,277 m³.

4. Criação de planos

Para esta fase, o *software* utilizado foi o *Inventor* da *Autodesk*®, um *software* muito dinâmico e de fácil utilização. O procedimento para a criação dos planos teve em conta os seguintes passos:

1. Importação do modelo em formato “STEP”, uma vez que se está a lidar com um modelo geométrico;

2. Criação de desenhos a partir do modelo importado. Para além das ferramentas que o *software* apresenta de edição também possui uma opção de extração de desenhos do modelo automaticamente. A criação de desenhos a partir do modelo pode ser feita em vários planos e perspetivas;
3. Exportar a informação. Após definir os planos e perspetivas de interesse é possível exportar a informação em “DWG”;

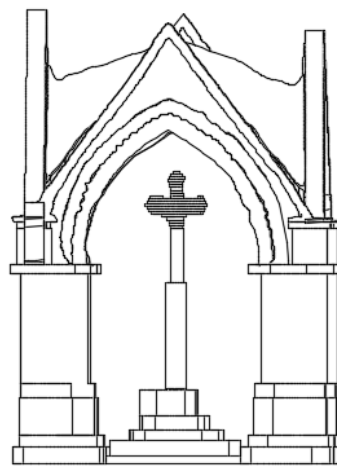
Os resultados da criação de planos para ambos os casos de estudo estão de seguida:

Padrão do Salado

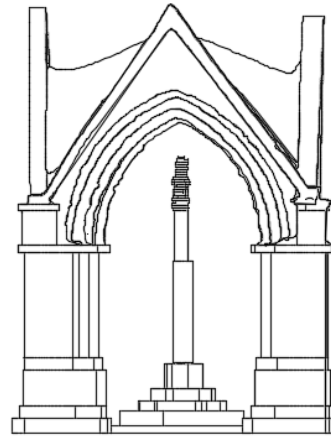
Modelo *Geomagic Design X*®



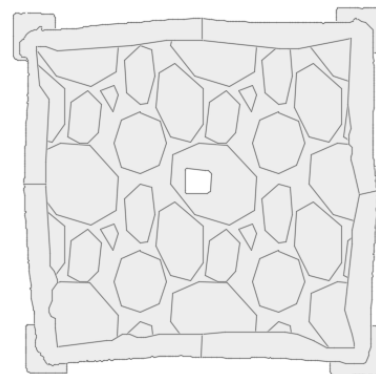
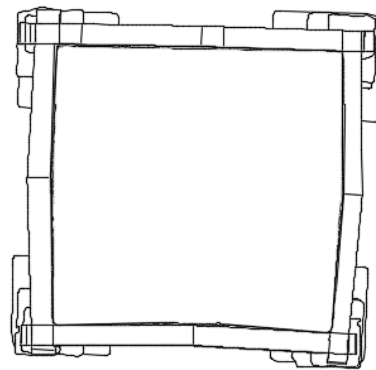
Levantamento Geométrico



Na figura à direita está representado o levantamento geométrico do alçado principal do Padrão do Salado. É apresentado um corte da visualização em *AutoCAD*® que se encontra em formato “DWG” e que se encontra mais pormenorizado em anexo assim como todos os alçados, plantas e planos representados a seguir.

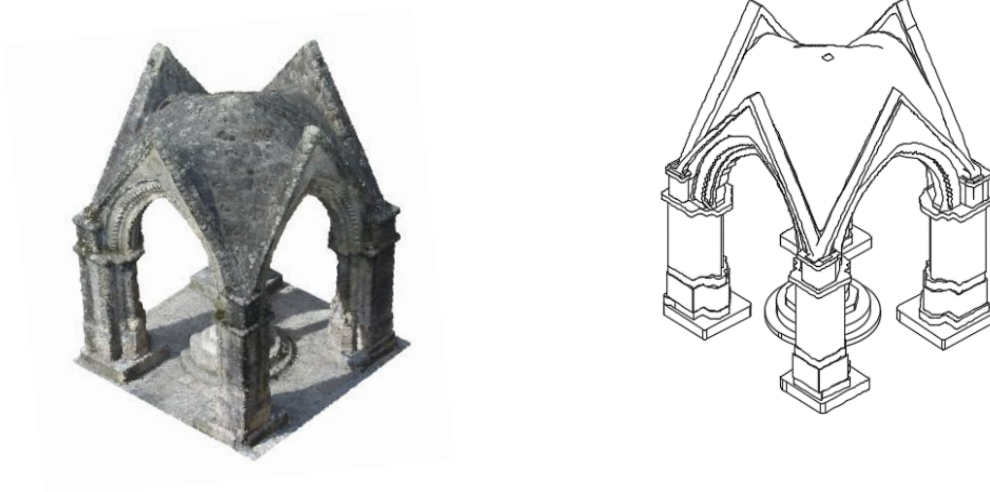


Na figura à direita está representado o levantamento geométrico de outro alçado do Padrão do Salado.



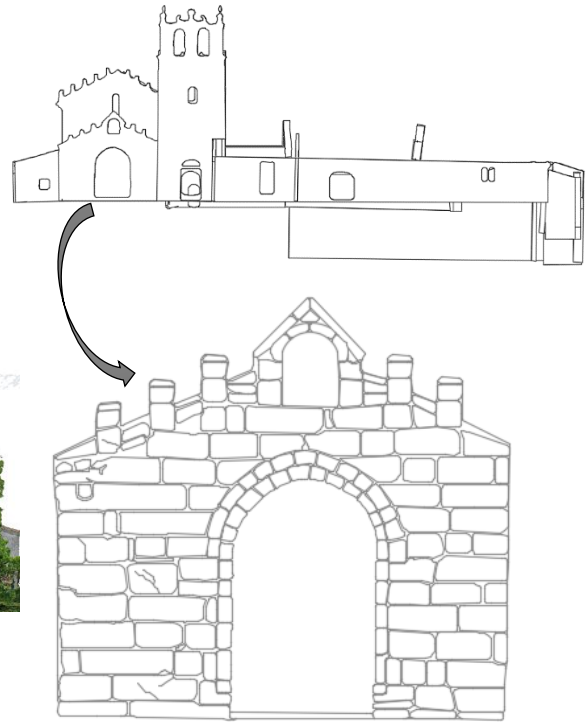
À direita, o primeiro desenho representa levantamento geométrico da cobertura do Padrão do Salado. O segundo desenho representa um pormenor realizado a título experimental. É possível com recurso a fotogrametria levantar mais pormenorizadamente qualquer que seja a seção do objeto como se pode verificar nesta figura.

Contudo, este levantamento torna-se um pouco moroso, embora que seja preciso. É possível fazer este tipo de levantamentos geométricos através do contorno por linhas que são unidas por pontos pertencentes à nuvem de pontos do modelo gerado.

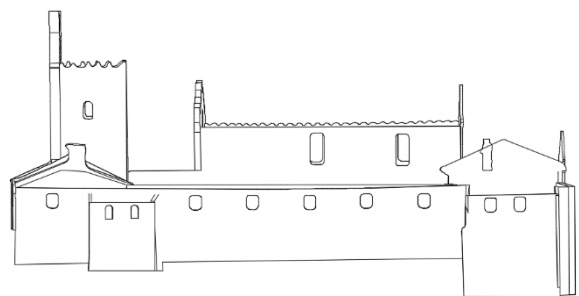


Na figura à direita está representada uma perspectiva do modelo geométrico.

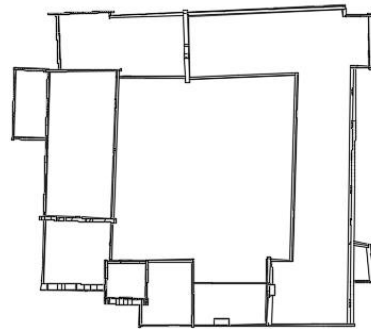
Figura 4.9: Principais perspectivas do levantamento geométrico

*Mosteiro de Mancelos***Modelo *Geomagic Design X*****Levantamento Geométrico**

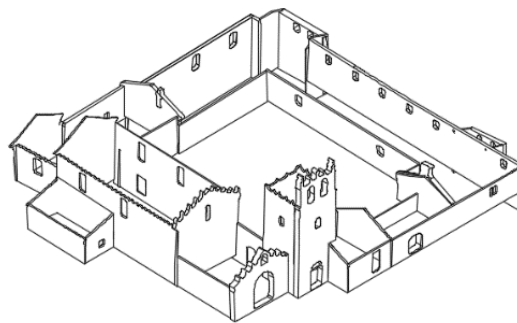
À direita, na parte superior está o levantamento geométrico da fachada principal do Mosteiro de Mancelos. Está representada na parte inferior uma parte desta fachada pormenorizada a título experimental. É possível com recurso a fotogrametria levantar com mais pormenor qualquer que seja a seção do objeto como se pode verificar. Contudo, este levantamento torna-se um pouco moroso. Este levantamento decorreu através do contorno por linhas que eram unidas pelos pontos da nuvem de pontos densa do modelo gerado através de uma ferramenta da *Autodesk*®.



Na figura à direita está o levantamento geométrico de uma fachada do Mosteiro de Mancelos. Como é possível verificar (na figura à esquerda) a fachada encontra uma elevada área coberta por vegetação, o que, tornou esta parte do levantamento mais complexa. Contudo, através da intuição e da ligação de pontos obtidos pela nuvem de pontos foi possível fazer o seu levantamento geométrico como está representado.



A figura à direita é um corte da visualização em *AutoCAD*® que representa a planta do Mosteiro de Mancelos. É possível mencionar uma evidente desvantagem da fotogrametria neste tipo de levantamentos. O facto de não ser possível levantar as divisões interiores das estruturas é um ponto ainda a ser estudado na técnica da fotogrametria.



Na figura à direita está o levantamento geométrico em perspectiva do Mosteiro de Mancelos. A parte da cobertura não foi levantada devido ao elevado nível de complexidade que esta representava nos levantamentos.

Figura 4.10: Principais perspetivas do levantamento geométrico

4.2.2 Parâmetros de controlo

Um levantamento geométrico está muito dependente da qualidade com que a aquisição dos dados que é efetuada. Para tal, é imprescindível um prévio estudo e análise do objeto, onde deve ser feito um plano de voo e a onde são selecionados os equipamentos necessários para o levantamento das fotografias de acordo com o resultado que se pretende obter.

Mesmo com uma correta aplicação dos métodos, isto é, seguindo todos os aspetos de processamento da fotogrametria referidos em capítulos anteriores surgem erros na criação dos modelos tridimensionais.

Estes erros podem ser determinados pelos *softwares* fotogramétricos. Normalmente estão relacionados com a fraca precisão da localização das correspondentes projeções pontuais na etapa de correspondência dos pontos e isto acontece porque apesar de se seguir os procedimentos exigidos na fotogrametria, alcançar 60% de sobreposição em fotografias de toda a envolvente de uma construção com o porte do Mosteiro de Mancelos ou do Padrão do Salado é bastante difícil.

4.2.3 Discussão dos resultados

Com a finalização destes dois casos de estudo, foi possível tecer algumas conclusões relativamente aos levantamentos geométricos com recurso à fotogrametria:

- Permite obter uma quantidade muito elevada de dados, em determinadas circunstâncias, a três dimensões;
- Os resultados, desde que os levantamentos sigam os requisitos necessários, são muito precisos e obtidos de forma rápida, porque são processados automaticamente por um conjunto de pontos, contrariamente aos métodos tradicionais;
- A questão do limite de alcance é um ponto a favor na fotogrametria devido à utilização de *drones*. O piloto consegue configurar todos os aspetos do *drone* que tem a capacidade de sobrevoar até 500m e três baterias que têm a duração de 25 minutos cada uma.

- Não é necessário um *hardware* específico e, por conseguinte, ao contrário da monitorização através do *laser*, as restrições de espaço e as dificuldades de posicionamento não se colocam;
- Possui uma relação custo/benefício reduzida, uma vez que podem ser utilizadas câmaras digitais não profissionais e o investimento em materiais é reduzido;
- Necessita de mão-de-obra especializada na pilotagem do *drone*.

Após a conclusão do levantamento geométrico de ambos os casos em estudo nesta aplicação foi possível deduzir certas particularidades em relação às dificuldades sentidas em cada um deles.

No levantamento geométrico do Padrão Salado, em que a sua dimensão não era excessivamente grande, pelo contrário, o elevado nível de detalhe na alvenaria provocou certas dificuldades e, por isso, foi o levantamento mais moroso ainda que como já foi referido fosse o mais pequeno.

Relativamente ao Mosteiro de Mancelos, uma vez que os levantamentos fotográficos não foram da melhor forma planeados, surgiu uma adversidade que infelizmente ainda não é totalmente ultrapassada pela fotogrametria, que é o facto da envolvente de a estrutura estar muito coberta por vegetação e por isso há uma falta considerável de detalhe nas fotografias captadas que prejudicou a criação deste modelo. Contudo, mostra ser uma técnica que, de uma forma geral, ultrapassa estes obstáculos como foi possível observar anteriormente.

4.3 Criação de Modelos Numéricos Estruturais

As metodologias modernas de conservação e reabilitação de estruturas históricas requerem análises estruturais cada vez mais detalhadas, o que torna necessário o desenvolvimento de modelos numéricos capazes de prever eficazmente o seu comportamento estrutural.

A seleção de um determinado método numérico depende essencialmente do conhecimento do técnico, da análise pretendida e dos objetivos do estudo, tendo sempre em mente que análises

mais complexas não são necessariamente sinónimo de melhores resultados (Bruno Silva, João Miranda Guedes 2008).

A caracterização de um modelo numérico para a análise do comportamento estrutural é um tema complexo, rodeado de inúmeros fatores incertos onde são colocados importantes desafios que se prendem, essencialmente, pela complexidade da sua geometria e pormenores construtivos, assim como a variabilidade das propriedades dos materiais que as compõem e o desconhecimento das técnicas de construção utilizadas.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método de análise numérica abordado para determinar as soluções aproximadas, onde um problema é subdividido em partes menores, denominadas de elementos finitos.

A fotogrametria apresenta para a criação de modelos MEF uma mais-valia na medida em que possibilita gerar os modelos sólidos. Através da troca de informação entre os *softwares* de análise numérica e os *softwares* do tipo CAD é possível importar um modelo geométrico criado pela técnica fotogramétrica e fazer a sua análise numérica.

O objetivo desta aplicação é a criação de um modelo numérico, no qual é possível fazer determinada análise referente às características e propriedades da estrutura em questão, de acordo com os resultados que se pretendem obter. Enquanto no passado muitos dos utilizadores do FEM estavam envolvidos no desenvolvimento da técnica pela programação em computador, verifica-se, hoje em dia, que a quase totalidade dos projetistas de estruturas apenas se preocupa com a utilização do correspondente *software* numa ótica de utilizador para a interpretação dos resultados obtidos.

Como o interesse deste projeto reside na análise e diagnóstico estrutural através da fotogrametria, não é relevante dar ênfase à parte algorítmica que envolve os modelos numéricos, podendo esta ser considerada uma outra área de estudo. O importante no ponto de vista da engenharia civil é a análise dos resultados que irão ser obtidos através do modelo numérico.

Para a criação deste modelo numérico foi utilizado como ponto de partida o modelo sólido gerado no levantamento geométrico do Padrão do Salado. É importante reforçar a ideia de que

não serão alvo de estudo aprofundado os resultados obtidos na análise numérica dos modelos gerados. Apenas se tenciona mostrar como a fotogrametria pode ser um meio de os alcançar, i.e., como através de modelos sólidos gerados pela fotogrametria se pode estudar o comportamento estrutural num programa com potencialidades de análise numérica em estruturas.

4.3.1 Procedimentos

O modelo numérico consiste simplifadamente na geração de um modelo geométrico em elementos finitos virtuais onde, aplicando certas propriedades ou características de acordo com o que se pretende analisar, se pode observar o comportamento da estrutura através de uma simulação computacional. Para a criação deste modelo de elementos finitos foi utilizado o *software* *FX+* da *MIDAS*®, com a seguinte metodologia:

1. Importação do modelo geométrico criado nos levantamentos geométricos pelo *Geomagic Design X*® no formato “STEP” (formato que contém a informação geométrica de um modelo) (ver Figura 4.11);
2. Definição das propriedades mecânicas. Neste passo o *software* permite importar ou definir o tipo de material de que é constituído o modelo geométrico, indicando as suas propriedades mecânicas;
3. Geração da malha (ver Figura 4.12). O *software* permite criar de forma automática uma malha de elementos finitos para posterior simulação de comportamento caso seja o pretendido;

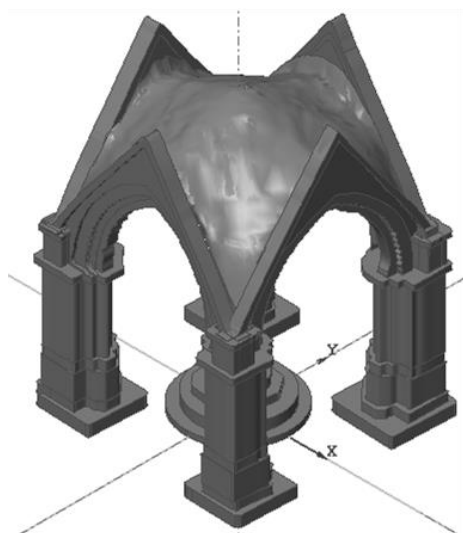


Figura 4.11: Modelo geométrico importado no FX+ da MIDAS®

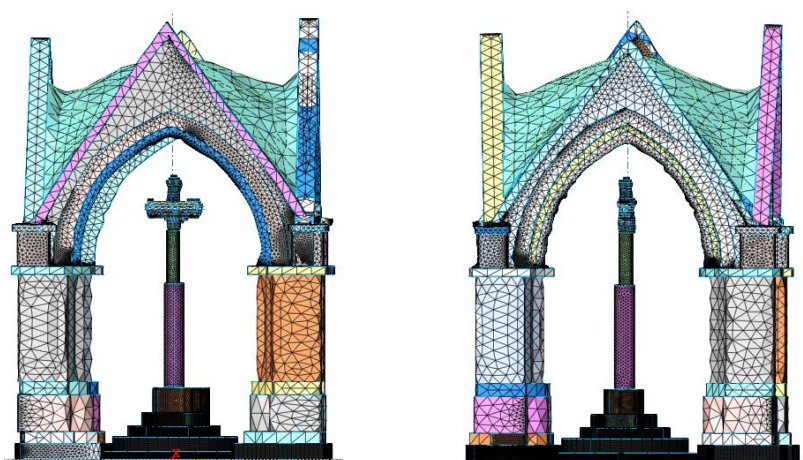
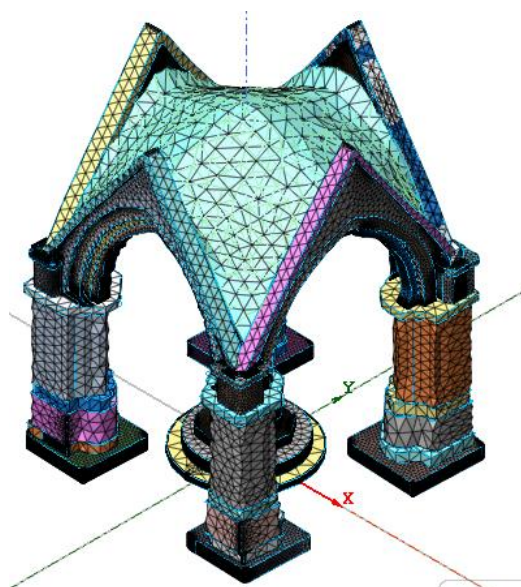


Figura 4.12: Modelo de elementos finitos no FX+ da MIDAS®

A partir do sólido da Figura 4.11 foi gerada uma malha de elementos finitos do Padrão do Salado (Figura 4.12). Este modelo de elementos finitos foi criado de forma automática e com valores de tamanho da malha e propriedades dos materiais aleatórios.

O *software* identifica cada elemento do modelo geométrico como um sólido identificado por cores diferentes e, em cada um deles, cria uma divisão “virtual”.

4.3.2 Discussão dos resultados

Graças à capacidade da troca de informações entre os programas facilmente foi possível de importar o modelo sólido no *FX+ da MIDAS®*. Uma vez que foi utilizado o formato “STEP” o modelo sólido incluiu todas as informações de contorno e volumes do modelo sólido originado pelo *Geomagic Design X®*.

A fotogrametria entra como um elemento importante na execução de modelos numéricos pelo facto de importar diretamente os modelos sólidos de outro *software*. O tempo dispensado para a realização dos modelos sólidos manualmente no *FX+ da MIDAS®* feito de raiz demoraria pelo menos alguns dias face à complexidade de detalhe do objeto em estudo enquanto que pela fotogrametria, uma vez que, o modelo sólido já estava criado, demorou alguns segundos, pois só foi necessário a sua importação.

Através desta técnica é perfeitamente acessível a um projetista a obtenção de resultados credíveis para análises numéricas, mesmo quando não tem acesso à fonte do código computacional ou quando desconhece características do modelo que está a utilizar (Bruno Silva, João Miranda Guedes 2008).

Devido à complexidade associada ao desenvolvimento de modernos programas de computador dispondo de uma interface gráfica associada, o desenvolvimento de *softwares* com o intuito de criar os modelos numéricos tem sido cada vez mais restringido às empresas especializadas e por isso os custos envolvidos neste tipo de *softwares* têm ainda um valor significativo.

4.4 Medição de Grandes Deformações

A observação e monitorização de construções antigas permite conhecer aspetos do seu comportamento ao longo do tempo, nomeadamente o estado da sua deformação.

A deformabilidade numa estrutura é uma propriedade que requer especial atenção, principalmente quando se trata de uma construção mais antiga, onde é comum a falta do conhecimento das suas características mecânicas e comportamento estrutural. Pretende-se com este projeto mostrar como a fotogrametria pode ser uma ferramenta útil na medição destas deformações.

O alvo de estudo nesta aplicação foi uma das fachadas do Paço dos Duques de Bragança, em Guimarães. A fachada a Sudoeste destaca-se pela visível deformação que apresenta. Provavelmente, questões relacionadas com a arquitetura interior levaram a este fenómeno. Como o valor desta deformação é desconhecido, a sua determinação através da fotogrametria será uma ótima aplicação para a verificação da aplicabilidade desta a estes casos.

4.4.1 Procedimentos

Para esta tarefa, foi utilizado o *Geomagic Design X*®. Na Tabela 4.5 estão organizados os procedimentos a seguir para a medição da deformação:

Tabela 4.5: Procedimento para medir a deformação na fachada do Paço dos Duques, em Guimarães

1. Importar o modelo

Importação do modelo em forma de uma malha de pontos tridimensional no formato “PLY” e seleção das unidades de medida utilizadas no *software*;



2. Delimitar um plano

Delimitação da fachada lateralmente através da seleção de vários pontos para posterior criação de um plano “virtual”. No mínimo são necessários três pontos para que se possa criar um plano tendo em conta que quanto mais pontos forem selecionados mais precisa a medição da deformação;



3. Criar um plano

Criação de um plano virtual a partir do esboço criado na fase anterior;



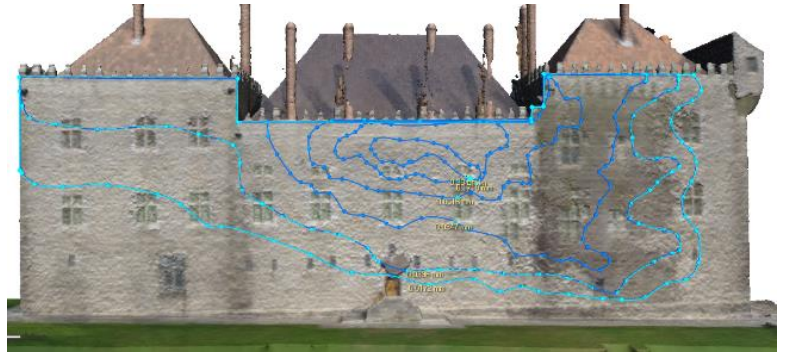
4. Delimitar a deformação

Como se pode ver pela figura ao lado, é possível delimitar toda a área que está para fora do plano, ou seja, a deformação;



5. Curvas de nível

Após a criação de novos planos “virtuais” foi possível criar curvas de nível de 0.05 m em 0.05 m a partir da superfície da fachada.



6. Medir

Através de uma ferramenta de medição é possível medir a distância entre um plano e um ponto. O ponto mais distante do plano, é onde ocorre o maior deslocamento (na menor curva de nível).

Fazendo zoom, pode ver-se em perspetiva a distância entre o plano “imaginário” criado no ponto 3 e um ponto selecionado aleatoriamente dentro de uma curva de nível.

A menor de curva de nível (dada por um ponto (ver a primeira imagem)) representa a posição onde ocorre maior deslocamento, neste caso 0,3049 m.



4.4.2 Observações

A facilidade com que é possível medir deformações através de fotogrametria faz desta técnica uma ferramenta de alto interesse para o levantamento de estruturas.

O menor tempo dispensado e a acessibilidade que os *drones* possibilitam de aceder a zonas de difícil acesso são fatores que contabilizam para a sua utilização. Em comparação com a possibilidade de aplicar outras técnicas de medição tradicionais de deformações a fotogrametria representa uma ser mais-valia. Em relação às técnicas de medição tradicionais, como o levantamento por estação total/teodolito a fotogrametria entra em vantagem uma vez que, utiliza métodos mais acelerados e não necessidade de mão-de-obra especializada.

Relativamente às técnicas de medição de deformações, desta vez, automáticas, há a possibilidade de o fazer através do *laser*. Esta técnica apesar de apresentar um elevado nível de detalhe em levantamentos de deformações o seu rácio custo/qualidade comparado com o da técnica fotogramétrica não é justificado a sua utilização.

Contudo, esta técnica para medir deformações não é totalmente precisa, assim como as outras que existem. Não sabemos até que medida está correto medir a deformação do meio de uma fachada com referência nas suas laterais como o que foi feito neste caso de estudo.

4.5 Mapeamento e Análise de Anomalias

Uma vez que a fotogrametria faz o levantamento das construções através da captura e tratamento de imagens apenas são detetadas anomalias visualmente detetáveis, ou seja, fendas, deformações, deterioração superficial, anomalias resultantes da ação de agentes biológicos ou oxidação dos elementos metálicos (Roseiro 2012). Nestes casos, a fotogrametria também pode ajudar a detetar estas anomalias. Uma vez que cada ponto possui a informação de cor pelo código RGB, estas propriedades levam o utilizador à identificação de anomalias detetadas através da informação colorimétrica (Design 2013).

Na Tabela 4.6 estão identificadas as anomalias passíveis de serem identificadas com recurso à fotogrametria e os respetivos modos de identificação. Para apresentar o uso da fotogrametria

na deteção das anomalias será utilizado o caso de estudo da fachada principal do Mosteiro de Mancelos, em Amarante.

Tabela 4.6: Tipo de anomalias detetáveis através da sua análise de cor RGB e intensidade de pixéis

Deteção através de	Anomalias
Cor (RGB)	Colonização biológica de cor clara; Colonização biológica de cor escura; Estalactites resultantes da cristalização de resíduos transportados pela chuva; Oxidação dos elementos metálicos.
Intensidade de pixéis	Fendilhações; Desagregações/esmagamento; Defeitos de construção.

4.5.1 Procedimentos

O sistema de identificação das anomalias pode ser efetuado através de dois meios, i.e., pela cor (RGB), ou pela intensidade de pixéis. Para o processamento das imagens, foi novamente utilizado o *Geomagic Design X*®.

1. Identificação através da cor

A identificação de uma anomalia por cor é permitida devido às aptidões que o *software* apresenta para seleccionar uma dada região da nuvem de pontos importada baseada na similaridade da cor. Clicando num ponto ou seleccionando uma cor pré-definida, esta ferramenta selecciona todos os *pixéis* adjacentes com cor semelhante, permitindo também que a tolerância à variação de cor seja aumentada.

Para a fachada em estudo foram identificadas as colonizações biológicas de cor escura e clara através da selecção por cor em tons de verde como é possível ver na Figura 4.13.



Figura 4.13: Identificação de colonização biológica na fachada principal do Mosteiro de Mancelos

É perceptível a área com colonização biológica representada na figura. Uma vez que se trata de uma construção mais antiga é normal o aparecimento destas anomalias no decorrer do tempo. No entanto é importante ver a evolução desta anomalia, caso aumente significativamente devem ser tomadas medidas de correção para prevenir danos futuros. A aplicação da fotogrametria para casos relacionados com este campo apresenta mais uma vez, ser uma vantagem pela rapidez e custo que envolve.

2. Identificação através da intensidade de pixéis

Excluindo a torre da fachada principal, o Mosteiro de Mancelos tem um portal em alvenaria que será alvo de estudo para esta identificação. As anomalias são detetadas a partir das discontinuidades na imagem, como regiões ou pontos, onde ocorrem mudanças bruscas no nível da intensidade dos pixéis. O procedimento seguido foi o seguinte:

1. Após importar o modelo, aplica-se uma ferramenta designada por “smooth” própria do software que reduz os efeitos da rugosidade da nuvem de pontos através da

eliminação dos desvios indesejados e é criada uma linha média como está ilustrado na Figura 4.16;



Figura 4.14: Esquema representativo da ferramenta Smooth no Geomagic Design X®

2. Após a fase anterior procede-se à interpretação e sistematização das intensidades, de forma a perceber as características regulares no conjunto da alvenaria. Uma vez que é normal haver uma geometria similar no conjunto dos blocos de pedra constituintes de uma fachada, caso sejam identificadas linhas de pontos que não sejam geometricamente idênticas estaremos presente uma irregularidade que após a sua análise poderá distinguir-se como anomalia ou não;
3. Na Figura 4.15 está representado um conjunto de pontos que fazem parte da fachada do Mosteiro e neles estão assinaladas as irregularidades identificadas pela alteração da geometria através da intensidade de *pixéis*.

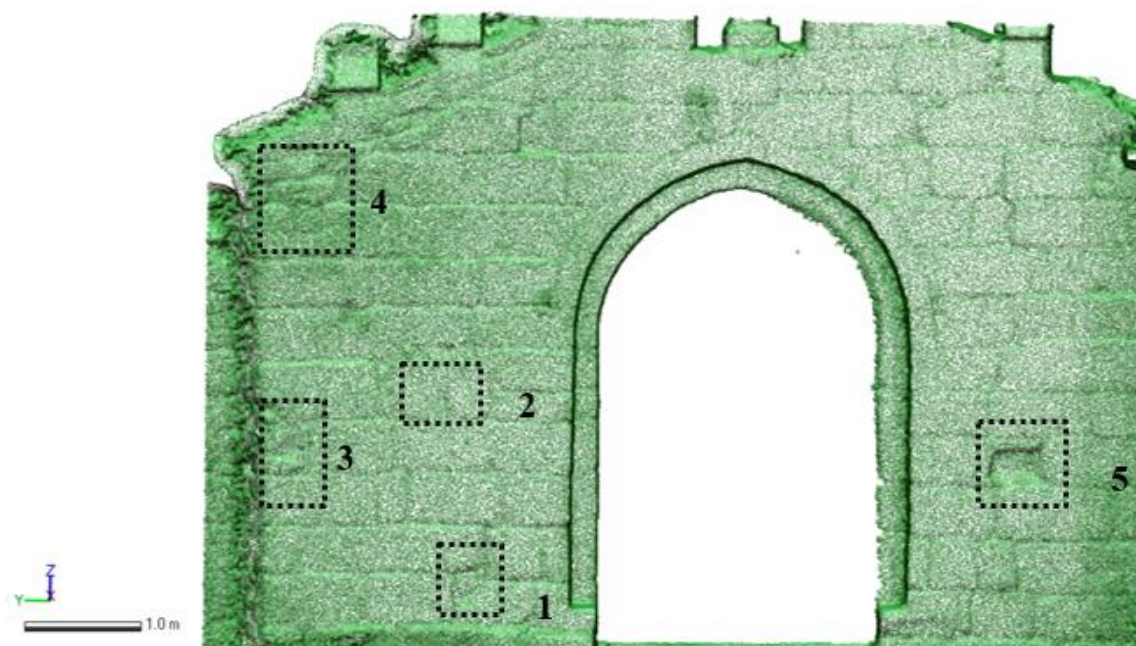


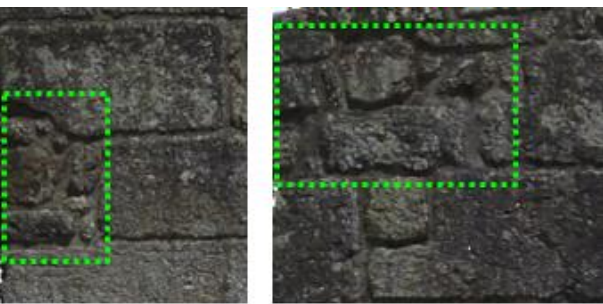



Figura 4.15: Nuvem de pontos na fachada do Mosteiro de Mancelos

Na Tabela 4.7 apresenta-se o resultado da identificação de anomalias.

Tabela 4.7: Anomalias na fachada principal do Mosteiro de Mancelos

ID	Representação (Ortofoto)	Anomalia
1		<p>Esta alteração na intensidade de <i>pixéis</i> demonstra uma provável desagregação da pedra ou má construção. Há uma clara irregularidade no tamanho da pedra em comparação com a sua envolvente.</p>
2		<p>Fenda na pedra com aproximadamente 45 cm de comprimento.</p>
3, 4		<p>Defeito na construção. É perceptível a irregularidade e tamanho das pedras de alvenaria nestes dois pontos em comparação com as da restante fachada.</p>
5		<p>É notório um pequeno orifício que pode ser uma desagregação ou esmagamento ou a forma mesma da pedra. Não é bem perceptível esta distinção apenas através da análise pela intensidade dos <i>pixéis</i>.</p>

4.5.2 Discussão de resultados

O principal objetivo desta aplicação ser realizada com recurso à técnica da fotogrametria está associado à maior rapidez com que as recolhas dos dados podem ser efetuadas, assim como, a precisão com que os objetos são levantados e a capacidade de aceder a zonas de difícil acesso.

Contudo, não é suficiente apenas o recurso a esta técnica, pois o tipo de anomalias registado por este processo é muito restrito e subjetivo.

Através da identificação das anomalias pela cor, foi possível verificar que o portal principal do Mosteiro de Mancelos apresenta uma área de colonização biológica.

Através da identificação das anomalias por intensidade de *pixéis* foi possível verificar que a mesma fachada apresenta algumas fendas e vestígios de má construção nas pedras de alvenaria que a constituem.

4.6 Levantamento e Análise Histórica de Elementos Construtivos

O levantamento e análise histórica dos edifícios permite, tendo em conta o período de construção, os materiais, técnicas construtivas e estilos arquitetónicos comuns nesse período, a compreensão do estado real da construção e ajuda na interpretação de todos os elementos presentes na estrutura. As formas utilizadas para a construção divergiram e evoluíram ao longo da História, dependendo em larga medida das ferramentas e da mão-de-obra, do tipo de materiais ou das técnicas construtivas utilizadas, entre outros.

A Arqueologia Arquitetónica é a disciplina que permite, utilizando uma metodologia arqueológica, a elaboração da história de um edifício mais antigo, construído ao longo do tempo, sujeito a remodelações e transformações. Ao contrário da tendência tradicional, da interpretação do edificado do ponto de vista arquitetónico e estrutural, o edifício é visto no contexto arqueológico, o que permite adicionar à interpretação histórica novos dados (Santos 2013).

A questão está em como a fotogrametria pode apoiar no levantamento e análise Histórica das fases construtivas de uma edificação. E a resposta está diretamente relacionada com a




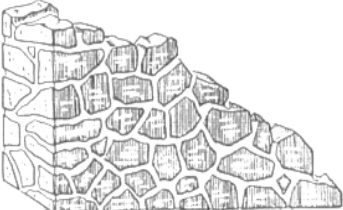
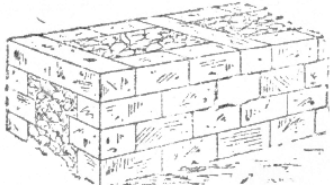
capacidade que a fotogrametria tem de recolher informação detalhada e exata sobre qualquer que seja a área visualmente detetável no caso a analisar.

Após efetuar o levantamento dos elementos construtivos é possível, através de extensas bases de dados de Arqueologia, comparar materiais, geometria e técnicas de construção utilizadas que remetem para a época ou ano em que foram construídos.

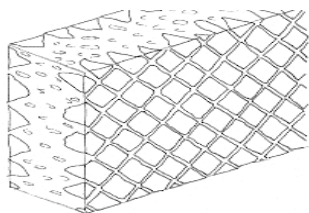
É importante referir que não é de interesse para a aplicação da fotogrametria o estudo aprofundado da Arqueologia, mas sim, a forma como é possível aplicá-la para fazer os levantamentos e as análises históricas dos elementos construtivos de uma estrutura.

De seguida está representada, a título informativo, uma tabela (Tabela 4.8) onde se apresentam as principais evoluções da alvenaria de pedra.

Tabela 4.8: Principais elementos primitivos de alvenaria de pedra sem reforço

Elemento construtivo	Característica	Época
<p>Construção ciclópica</p> 	<p>Formado por enormes blocos irregulares, com intervalos preenchidos por pedras menores, ligados entre si por argila;</p>	<p>Arquitetura da Grécia Antiga Séculos XV - XII a.C.</p>
<p>Aparelho Pelásgico</p> 	<p>Blocos como saíam da pedreira, mas escolhidos com forma aproximadamente paralelepípedica, normalmente são assentes nem sempre com junta desencontrada;</p>	<p>Arquitetura da Grécia Antiga Século X a.C.</p>
<p>Aparelho poligonal Pelásgico</p> 	<p>Semelhante ao anterior, mas com pedras menos paralelepípedicas, mais irregulares não formando fiadas horizontais, apenas definindo um paramento;</p>	<p>Arquitetura da Grécia Antiga Século IX a. C.</p>
<p>“Opus incertum ou antiquum”</p> 	<p>Versão romana de alvenaria, onde são aplicadas pedras mais reduzidas do que as vistas anteriormente;</p>	<p>Arquitetura Romana Século II a.C.</p>
<p>“Opus emplectum”</p> 	<p>Usado em paredes muito grossas em que os blocos regulares formavam apenas os paramentos e o intervalo era preenchido com pedra irregular.</p>	<p>Arquitetura Romana Século II a.C.</p>

“Opus reticulatum”



Forma reticulada, formado por pedras regulares, talhadas com secção quadrada ou em losango e dispostas de forma a que as suas juntas formem uma rede de malhas quadradas. Estas pedras eram piramidais, o que permitia facilitar o seu assentamento.

Arquitetura
Romana
Século I a.C.

Para melhor aludir esta possível aplicação na fotogrametria será feita uma detalhada análise a uma das fachadas do Paço dos Duques de Bragança.

4.6.1 Procedimentos

Cada elemento construtivo remete a traços da época em que foi construído. E é esta associação que se pretende efetuar através da fotogrametria. As ortofotos geradas a partir do *Agisoft PhotoScan*® representam os pormenores na fachada livres de erros e deformações, permitindo a medição da sua geometria. A seguinte metodologia foi seguida:

1. Primeiro, é necessário efetuar uma pesquisa bibliográfica acerca da localização ou do próprio edifício, permitindo o conhecimento prévio e geral do objeto de estudo. Esta pesquisa pode ser orientada por fotografias, documentos, manuscritos, descrição de imagens, informação oral, etc.;
2. Após a primeira abordagem ao edifício, deverá ser efetuado um levantamento fotográfico mais próximo de todos os elementos construtivos. Este levantamento servirá de base à terceira fase do trabalho, a análise de todos os parâmetros, pelo que deverá abranger toda a área a estudar e ser tão pormenorizado quanto possível, representando fielmente os elementos arquitetónicos, os elementos construtivos, os revestimentos, etc.;
3. Com base nos dados recolhidos, nesta fase do trabalho elaborar-se-á uma base de dados que deverá conter toda a informação produzida sob a forma de fichas de registo, descrições, relações estratigráficas, levantamentos gráficos e fotográficos, ou análises efetuadas onde são identificadas as épocas ou ano em que foi contruída;

4. O modelo pormenorizado e interpretativo da evolução cronológica irá conter todas as unidades identificadas no edifício de acordo com a fase de construção em que se inserem.

A figura seguinte representa uma fachada do Paço dos Duques com a identificação dos respetivos elementos construtivos.

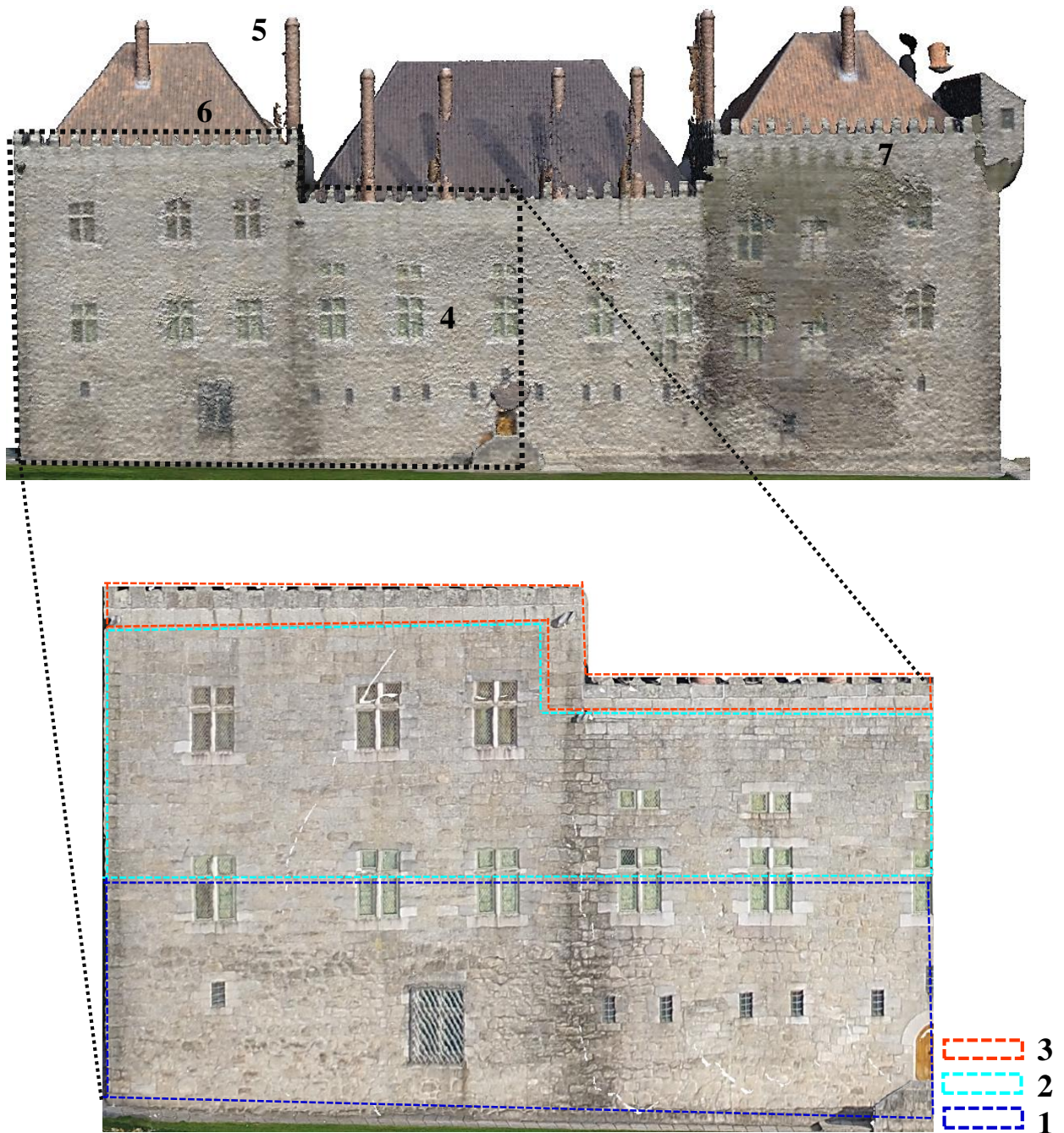
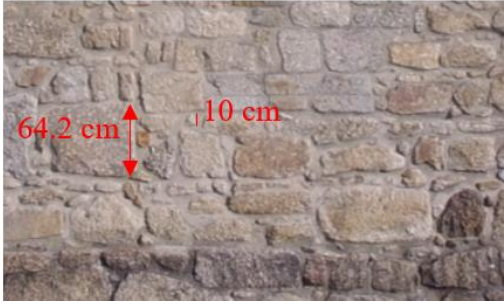
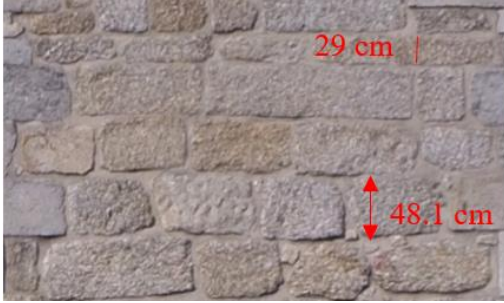
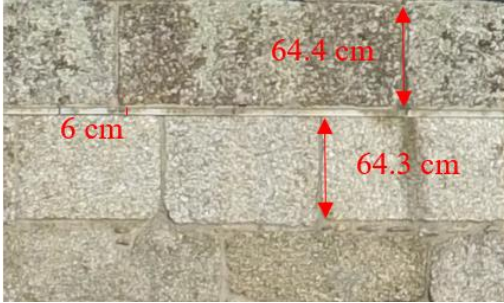


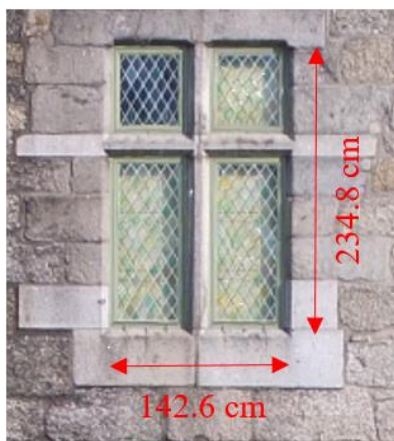
Figura 4.16: Alçado a Sudoeste do Paço dos Duques de Bragança após obras de restauro com ortofoto pormenorizada da alvenaria

A Tabela 4.9 designa-se para a identificação das características identificadas de cada elemento construtivo na figura anterior, fazendo o seu levantamento histórico.

Tabela 4.9: Elementos construtivos da fachada da Paços dos Duques de Bragança

ID	Elemento construtivo (ortofotos)	Características e inspiração dos elementos construtivos
1		<p>O piso térreo apresenta um aparelho de pedra com menor cuidado, com pedras muito irregulares (de altura entre os 10 e 65 cm aproximadamente), sem juntas horizontais e verticais bem definidas e sem justaposição adequada das pedras de alvenaria.</p>
2		<p>O segundo piso é em cantaria de granito de aparelho isódomo de tamanho irregular dos elementos (alturas entre os 30 e os 50 cm, aproximadamente), mas com juntas verticais e horizontais mais definidas e com justaposição das pedras de alvenaria.</p>
3		<p>Tal como no segundo piso, o terceiro piso é em cantaria de granito, mas com pedra de tamanho regular (altura com cerca de 65 cm aproximadamente) e com juntas horizontais e verticais bem definidas (cerca de 6 cm aproximadamente) e com justaposição da pedra de alvenaria.</p>

4



Janelas em forma retangulares (aproximadamente 1.43 m × 2.35 m) e cruzetadas no interior sobrepostas por janelas jacentes retilíneas.

Influência francesa, difundida em diversos palácios do Séc. XIV;

Influência no Paço dos Condes de Barcelos atualmente existente apenas em ruínas devido ao terramoto que deu em 1755;

5, 6



Chaminés de cerâmica altas e cilíndricas (cerca de 7.5 m de altura) com uma cobertura em coruchéu piramidal que coroa os remates;

Coberturas de quatro águas e de grande inclinação (rondam os 60°).

Tal como as janelas retangulares estes dois elementos também tiveram influência no Paço dos Condes de Barcelos;

7



Ameias com chanfro decoradas com flor-de-lis. Esta flor é uma figura heráldica muito associada à monarquia francesa, particularmente ligada com o rei da França, daí a sua influencia Francesa.

8



Portal em arco apontado com aduelas marcadas precedido por escadaria de lanços retos opostos com guarda plena em cantaria. A utilização dos portais em arco foi trazida para Portugal de Itália.

4.6.2 Discussão dos resultados

O levantamento histórico dos elementos construtivos de uma construção é essencial para a compreensão da tipologia da estrutura, dos materiais utilizados e possíveis danos.

Com o estudo feito ao Paço dos Duques, para além das características identificadas dos elementos construtivos foi possível identificar as suas correspondentes influências temporais de construção. Percebe-se claramente a divisão dos pisos e da diferença de materiais utilizados. Tal porque, a sua construção não foi sequencial uma vez que, em 1420 foi mandado contruir (primeiro piso), e entre 1937 e 1959 foi alvo de profundas obras de restauro e reedificação (segundo e terceiro piso).

A fotogrametria permitiu este levantamento de maneira simples, rápida, elevado detalhe e a custo reduzido sem qualquer mão-de-obra especializada. O que necessitaria de algumas semanas de estudos e levantamentos manuais pode ser feito em dias quando se recorre a esta técnica.

4.7 Modelos Virtuais para Promoção Turística

A promoção do Património Cultural construído passa necessariamente pela sua divulgação. Hoje em dia, a internet e as redes sociais, são a melhor, mais eficaz e mais rápida plataforma de promoção para fins turísticos.

A fotogrametria entra nesta aplicação com o objetivo de promover a criação de modelos virtuais para a promoção turística. Através destes modelos rapidamente é chamada a atenção do público no geral.

Para criar um modelo virtual tridimensional do Mosteiro de Mancelos foi utilizada uma plataforma online, o *Sketchfab*®, com a seguinte interface gráfica (ver Figura 4.17).

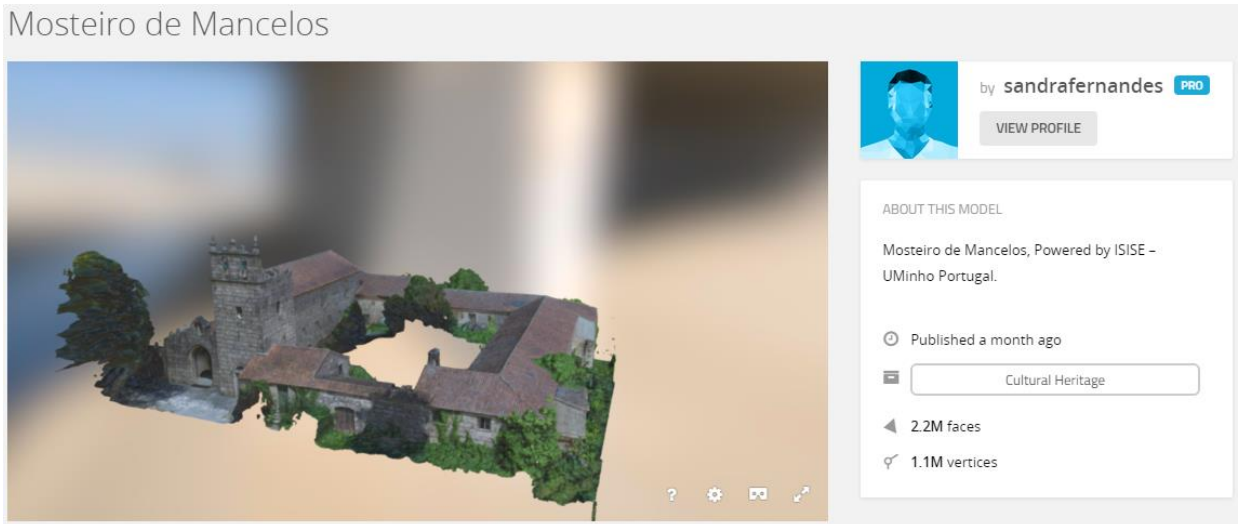


Figura 4.17: Apresentação gráfica no Sketchfab®

Esta plataforma permite importar ficheiros abertos do tipo “PLY”. Graças a isto, foi possível importar a nuvem de pontos do Mosteiro de Mancelos gerada para a criação de levantamentos geométricos com toda a informação espacial e cor.

Nesta plataforma é possível manusear aproximar, cortar e mudar a cor do modelo. É sem dúvida um instrumento apelativo para fins turísticos e fácil de partilhar via eletrónica.

Pode-se acede a este modelo clicando no link:

<https://sketchfab.com/models/d6b0b2cab6194fb98d43b92aeb91b9b1>

4.8 BIM

Na história recente da construção civil, os processos de projeto, construção e gestão têm sido beneficiados com as funcionalidades introduzidas pelas novas tecnologias de informação e comunicação, tais como o BIM, em particular nas construções correspondentes a equipamentos mais complexos (EASTMAN et al., 2011). O BIM representou, de certa forma, uma significativa evolução em relação às ferramentas eletrónicas utilizadas na Engenharia Civil. Transmitir apenas informação geométrica no formato CAD já não era suficiente, pois também era necessário incluir informação espacial, ligações paramétricas e atributos, pelo que, surgiram novos formatos. Através de algumas iniciativas na indústria da construção criou-se um *standard*

para a representação e organização de produtos da construção já referido em capítulos anteriores, o IFC.

O uso de modelos BIM para a operação e manutenção de edifícios construídos é uma nova forma de analisar o comportamento e deterioração do edifício ao longo do tempo, fornecendo informações do estado atual da edificação, além de seu histórico de manutenção e intervenções anteriores.

No que toca à aplicação ao património, no hBIM (*heritage* BIM) um dos pontos fulcrais para a preservação do edificado é a preservação e atualização da informação sobre o edifício e do historial das intervenções que nele foram realizadas, muitas vezes perdidos ou dispersos num elevado número de relatórios e documentos. Neste sentido, o BIM pode atuar como documento de arquivo do que resultou da informação de levantamento, análise e inspeção e intervenções. E tudo num formato aberto, único e digital. Assim, no domínio do património cultural, a captura de dados precisos e detalhados e a criação de modelos com a tecnologia hBIM apresenta-se como uma ferramenta com potencial para produzir um registo abrangente que considera os requisitos de manutenção peculiares destas edificações, incluindo a documentação sobre o ciclo de vida do edifício até ao presente. Basicamente, a criação de modelos 3D “ricos” em dados a partir da fotogrametria faz parte de um processo para se chegar a um modelo hBIM mais pormenorizado e simplificado (Akcemet et al. 2010). Ou seja, a fotogrametria funciona aqui como uma espécie de ferramenta de aquisição de informação essencialmente geométrica para o modelo hBIM, permitindo uma melhor gestão da informação *as-built* (da forma como quando foi construída).

Como foi possível observar no decorrer deste projeto, mais concretamente neste capítulo, a ligação entre diferentes tipos de *softwares* esteve praticamente sempre contemplada e por isso a fotogrametria é um meio de alcançar dados para pôr em prática o hBIM.

4.9 Limitações

A fotogrametria é uma técnica fácil de usar e de baixo custo. No entanto, reúne certas limitações e desvantagens na captura das fotografias e, conseqüentemente, na reconstrução dos modelos tridimensionais. Serão de seguida mostrados alguns exemplos para melhor entender os erros mais comuns.

- *Objeto muito pequeno*

Quando o objeto em estudo é muito pequeno, ou quando apenas é possível captar as fotografias do objeto de longe, apenas é ocupada uma pequena parte da fotografia (como se pode ver pela Figura 4.18). A maior parte da resolução e dos *pixéis* da fotografia são desperdiçados e caso o levantamento seja feito com esta característica é provável que se obtenha um modelo pouco rigoroso, devido à insuficiência de pontos válidos.



Figura 4.18: Objeto muito pequeno

- *Objetos finos ou transparentes*

Objetos reflexivos, brilhantes, transparentes, finos ou em movimento, como o caso do vidro e da água são uma limitação um pouco óbvia na técnica da fotogrametria. É improvável que este tipo de objetos e estruturas sejam reconstruídos em fotogrametria devido ao seu elevado nível de detalhe e por se confundirem os dados no espaço tridimensional quando são processados nos *softwares*. Foi o que aconteceu num dos casos em estudo neste projeto.

A malha espacial de madeira para a qual se pretendia fazer um levantamento geométrico (Figura 4.19) era constituída por barras muito finas e a criação de um modelo tridimensional seria bastante morosa e com um nível de detalhe muito reduzido devido aos dados gerados que se confundiram no espaço tridimensional. Pela Figura 4.20 podemos ver o resultado do modelo gerado do primeiro levantamento que foi efetuado para este caso de estudo, onde é possível verificar a ocorrência deste a “difusão” dos pontos na parte superior da malha.

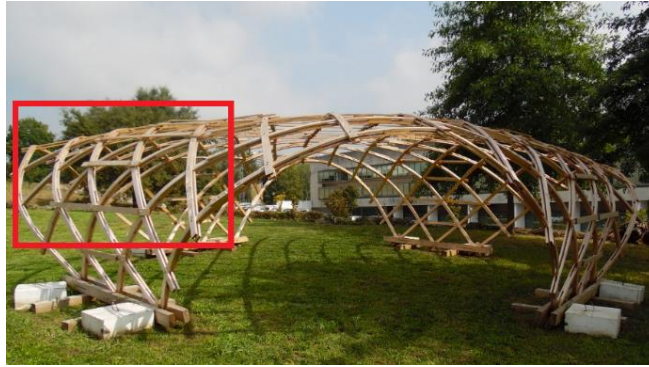


Figura 4.19: Malha espacial de madeira

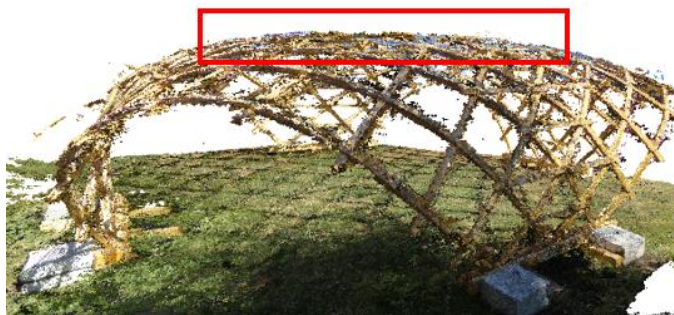


Figura 4.20: Modelo 3D da malha espacial em madeira

De forma a contornar esta situação foi feito outro levantamento de dados, com outras ferramentas (câmara fotográfica digital com melhor resolução), no entanto, pelo facto de não se ter sido usado um equipamento que permitisse captar fotografias da parte superior, não foi possível concluir o propósito deste levantamento, pois não havia informação suficiente na parte superior da malha de modo a calcular corretamente o deslocamento central (ver Figura 4.21).

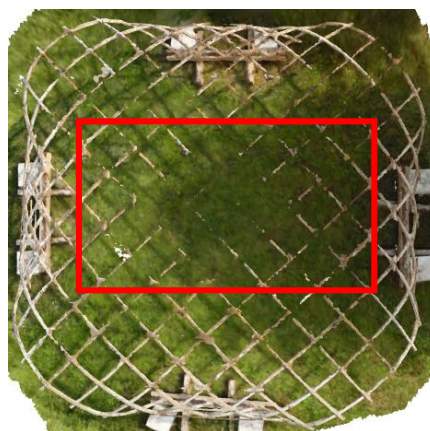


Figura 4.21: Malha espacial de madeira em planta

▪ *Vegetação*

Como foi possível ver anteriormente o excesso de vegetação na envolvente de uma construção prejudica a aplicação da fotogrametria assim como quaisquer outras técnicas de levantamento. A construção fica impedida de ser vista na fotografia. Não são captadas as informações reais dos objetos necessárias para processar as técnicas fotogramétricas (ver Figura 4.21).



Figura 4.22: *Fachada principal do Mosteiro de Mancelos coberta por vegetação*

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A simplicidade que a fotogrametria oferece na criação de modelos 3D é uma das características que fazem com que seja cada vez mais utilizada. Ao longo desta dissertação foram mencionadas as vantagens e desvantagens perante as aplicações consideradas possíveis de realizar através desta técnica. De uma forma geral, é possível completar este projeto com algumas opiniões formuladas que surgiram no decorrer das várias aplicações.

Como foi referido já várias vezes, a fotogrametria apresenta-se como uma técnica altamente vantajosa para o levantamento e no diagnóstico estrutural. A eficácia e rapidez com que podem

ser feitas medições e análises comportamentais detalhadas de uma estrutura sem qualquer tipo de registo anteriormente efetuado contribui para um contínuo desenvolvimento na reabilitação estrutural em especial de construções mais antigas.

De uma forma geral foram obtidos resultados muito satisfatórios nas aplicações que inicialmente foram definidas para estudar esta técnica, contudo há certos critérios que se forem refletidos poderão originar modelos ainda mais detalhados obtidos por fotogrametria. Existem ainda algumas limitações que num futuro desenvolvimento da técnica poderão ser ultrapassados.

A técnica da fotogrametria “faz frente” ao *laserscanning*, no entanto como já foi referido, não é justificável o recurso desta última, em exceção de situações onde a fotogrametria realmente não possa entrar como um recurso. Caso contrário, serão envolvidos custos elevados desnecessariamente.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

O caminho percorrido pela fotogrametria foi longo, no entanto é possível que se continue e se sigam procedimentos de forma a melhorar esta técnica continuamente. Tais como pela criação de formas mais simples para alcançar de igual modo bons resultados, que se poderão debruçar sobre os ideais que sigam este estudo, inovando e alargando o âmbito dos trabalhos atribuídos à engenharia das estruturas.

É esperado que novas aplicações surjam com grande frequência, à medida que os *softwares* e equipamentos se vão desenvolvendo e a potência de cálculo dos computadores cresce, tornando também este tipo de técnicas ainda mais acessíveis.

Adaptar novos aspetos em fotogrametria poderá estar na origem de uma nova (r)evolução para a técnica. A utilização de várias câmaras fotográficas ao mesmo tempo, por exemplo, é um aspeto que não foi estudado nesta dissertação, mas poderá ser de interesse num desenvolvimento futuro. A utilização de novas ferramentas e a aplicação em estruturas mais pequenas localizadas podem ser marcos para os desenvolvimentos que prometem melhorar a técnica fotogramétrica.

BIBLIOGRAFIA

Agisoft LLC, 2011. Agisoft PhotoScan User Manual. , p.37. Available at: www.agisoft.ru.

Australia, 2003. GORDON, S.; LICHTI, D.; STEWART, P.; FRANKE, J.; Modelling Point Clouds for Precise Structural Deformation Measurement; Western Australian Centre for Geodesy, Curtin University of Technology.

Baio, 1996. M. Avaliação de alterações de ocupação do solo por imagens numéricas multiespectrais. Lisboa, Universidade Nova de Lisboa. Tese de Mestrado.

Barazzetti, 2009. L. and M. Scaioni. Crack measurement: development, testing and applications of an automatic image-based algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(3): 285-296.

Basto, S., 2013. Paço dos Duques de Bragança. *Monumentos*, (33), pp.132–141.

Bruno Silva, João Miranda Guedes, A.C., 2008. Estratégias de Modelação Numérica no Estudo de Estruturas Históricas. Experiência do NCREP (FEUP). , pp.1–20.

Callan, 1998. R. The essence of artificial intelligence. Prentice Hall.

Canny, J, 1986. A computational approach to edge detection. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 8(6): 679-698.

Card, D. 1982, Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 48(3): 431-439.

Carrão, H., 2007. M. Caetano and P. Coelho. Sample design and analysis for thematic map accuracy assessment: an approach based on domain estimation for the validation of land cover products. San Jose, Costa Rica.

Cichonski, P. et al., 2012. Computer Security Incident Handling Guide: Recommendations of the National Institute of Standards and Technology, 800-61. Revision 2. *NIST Special Publication*, 800–61, p.79.

Corrêa, J.R., 2013. A evolução da fotografia e uma análise da tecnologia digital.

D, R.L.A., 1995. Mosteiro de São Martinho de Mancelos (Amarante) - Distrito do Porto | Guia da Cidade | Porto e Região Norte. Available at: <https://www.guiadacidade.pt/pt/poi-mosteiro-de-sao-martinho-de-mancelos-285544>.

Davis, B.E., 2000. N - Dados Matriciais (Raster) e Dados Vetoriais (Vector). , (Raster and vector data), p.24. Available at: https://docs.ufpr.br/~firk/pessoal/Carto_Digital/BED3.pdf.

Design, G., 2013. Geomagic Design X User Guide. , (November).

Dezen-Kempton¹, E. et al., 2015. 3D LASER SCANNING, PHOTOGRAMMETRY AND MODELING OF CONSTRUCTION INFORMATION FOR MANAGEMENT AND

OPERATION OF 3D HISTORICAL BUILDINGS. , 10(2), pp.113–124. Available at: <http://dx.doi.org.br/10.11606/gtp.v10i2.102710><http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v10i2.102710>.

Duerer, A., 1977. Early developments 1. *History of Photogrammetry*, 2(The Center for Photogrammetric Training).

Eisenbeiß, H. et al., 2009. *UAV photogrammetry*,

Ferrão, B. & Afonso, J.F., 2002. Edificações Do Centro Histórico E Sua Envolvente Com Interesse Patrimonial (Fichas). *Guimarães, Património cultural da humanidade*.

Ghosh, S.K., 1992. History of Photogrammetry - Analytical Methods and Instruments. *XVIIth ISPRS Congress Technical Commission VI: Economic, Professional and Educational Aspects of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXIX(B6), pp.311–327. Available at: http://www.isprs.org/proceedings/XXIX/congress/part6/311_XXIX-part6.pdf.

Gonçalves, L., 2009. Integração da incerteza na classificação e avaliação da exactidão temática de imagens multiespectrais. Coimbra, University of Coimbra. Tese de Doutoramento.

Gonçalves, L., C. Fonte, E. Júlio and M. Caetano, 2009. Assessment of the state of conservation of buildings through roof mapping using very high spatial resolution images. *Construction and Building Materials* 23(8): 2795-2802.

Gonzales, R., 2002. and R. Woods. *Digital image processing*. ed.Second Edition, Prentice Hall.

Gonzales, R., R., 2004. Woods and E. S. *Digital image processing using matlab*, P. Education.

Goodchild, M., 2003. Geographic information science and systems for environmental management. *Annual Review of Environment and Resources* 28: 493-519.

ISPRS, 2016. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. , (2010), pp.2–5.

- Kaufman, J., Rennie, A.E.W. & Clement, M., 2015. Single camera photogrammetry for reverse engineering and fabrication of ancient and modern artifacts. *Procedia CIRP*, 36, pp.223–229. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.073>.
- Kaufmann, V. & Ladstädter, R., 2007. Application of Terrestrial Photogrammetry for Glacier Monitoring in Alpine Environments. *Change*, 2700, pp.813–818. Available at: http://geoimaging.tugraz.at/viktor.kaufmann/ISPRS2008Beijing_Kaufmann.pdf.
- New York, 1993. GAYDE, J.; HUMBERTCLAUDE, C.; LASSEUR, C.; Prospects of Close Range. Digital Photogrammetry in Large Physics Installations; Proceedings of the fifth international workshop on Accelerator Aligment; Chicago – USA, 1997
- Ottawa, 2002. WHITEMAN, T.; LICHTI, D.; CHANDLER, I.; Measurement of Deflections in Concrete Beams by Close-Range Photogrammetry; Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications.
- Oliveira, E.M., 2012. Da fotografia analógica à ascensão da fotografia digital. Available at: <http://chile.unisinos.br/pag/oliveira-erivam-fotografia-analogica-fotografia-digital.pdf>.
- Oliveira, F., 2002. Francisco Henrique de Oliveira Francisco Henrique de Oliveira.
- Pereira, P.V., 2005. Qualidade e Gestão da Informação Geográfica na actividade de um Município. , p.111.
- Plátano, 2002. Almeida, G. Sistema Internacional de Unidades (SI) – Grandezas e unidades físicas, terminologia, símbolos e recomendações. ed.3.
- Professional, A. & Division, P., 1990. ASPRS ACCURACY STANDARDS FOR LARGE-SCALE MAPS The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Roseiro, J.R.F., 2012. *Causas anomalias e soluções de reabilitação estrutural de edifícios antigos: estudo de caso*. Available at: <http://run.unl.pt/handle/10362/8759>.

Santos, C.A. dos, Souza, A.I. de & Wangenheim, A. Von, 1998. Morfologia matemática. *Introdução à Visão Computacional*, pp.50–80.

Santos, J., 2010. *Fotografia - Luz, Exposição, Composição, Equipamento e ...*. C. Atlântico, ed., V. N. Famalicão.

Santos, R., 2013. Arqueologia da Arquitectura: conceito e metodologia. *Parc Pesquisa Em Arquitectura E Construção*, 4(1), pp.1–10.

Scuri, A.E., 2002. Fundamentos da Imagem Digital. , p.95.

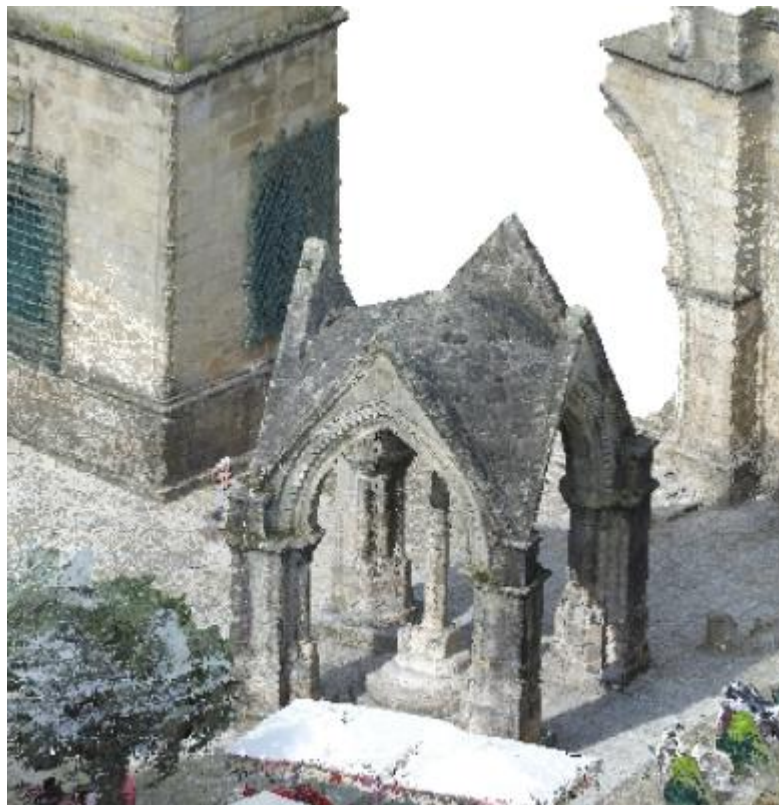
Steel, J., Drogemuller, R. & Toth, B., 2012. Model interoperability in building information modelling. *Software and Systems Modeling*, 11(1), pp.99–109.

Temba, P., 2001. Fundamentos da Fotogrametria.

Valença, A., 2011. *Por Processamento De Imagem E Análise Multi-Espectral*.

Valença, J., 2006. Aplicações de fotogrametria à engenharia de estruturas.

ANEXO I - RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO PADRÃO DO SALADO



DADOS DO LEVANTAMENTO

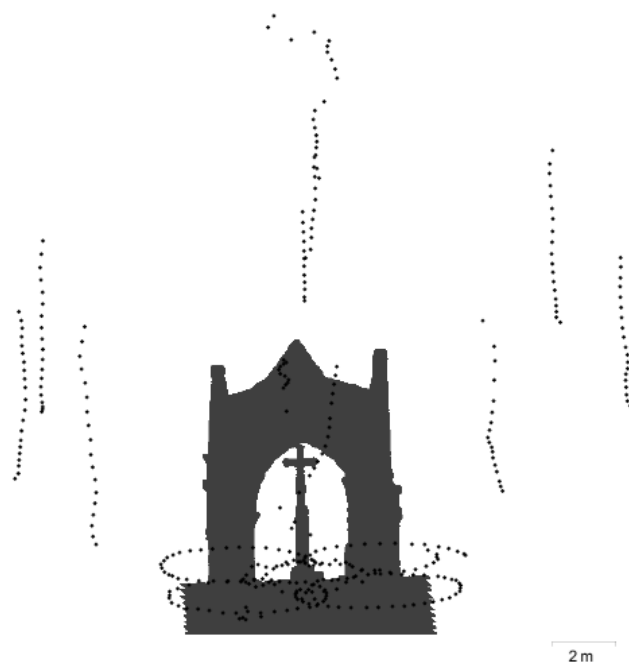


Figura A. 1: Localizações da câmara e sobreposições de imagem

Tabela A. 1: Características do levantamento

Número de Imagens	376
Altitude de voo	10,9 m
Resolução de solo	2.97 mm / pix
Área de cobertura	239 m ²
Estações da camara	376
Pontos de empate	171.557
Projeções	1.057.856
Erro de projeção	0.912 pix

Tabela A. 2: Características da camara fotográfica

Modelo da camara	Resolução	Comprimento focal	Tamanho do Pixel	Pré-calibrado
FC300X (3,61 mm)	4000 x 2250	3,61 mm	1,7 x 1,7 um	Não

CALIBRAÇÃO DA CAMARA

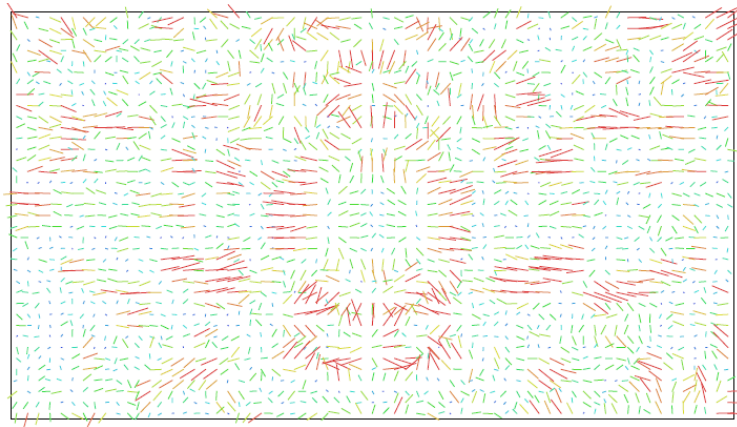


Figura A. 2: Resíduos de imagem para FC300X (3,61 mm)

LOCALIZAÇÕES DAS CAMARAS

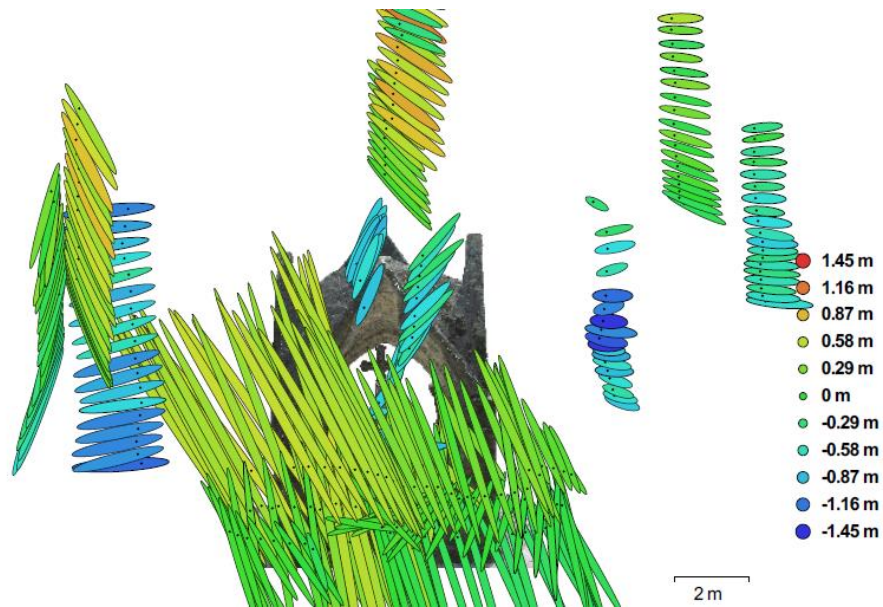


Figura A. 3: Localizações de camara e erros estimados

Tabela A. 3: Erro do levantamento

Erro em X (m)	Erro em Y (m)	Erro em XY (m)	Erro em Z (m)	Erro total (m)
0.812888	1.67947	1.86585	0.502104	1.93223

ELEVAÇÃO DO MODELO DIGITAL

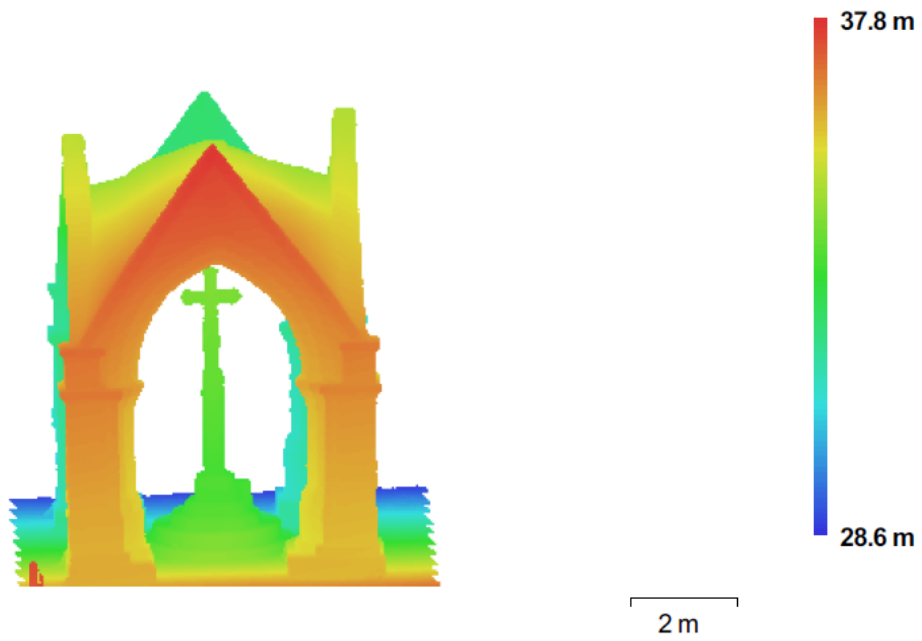


Figura A. 4: Modelo de elevação digital reconstruído

PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO**Geral**

Fotografias	376
Fotografias alinhadas	376
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)

Nuvem de pontos

Pontos	171,557 de 226,284
Erro de projeção	RMS 0,254781 (0,9117 pix)
Erro máximo de projeção	0.777199 (36.944 pix)
Sobreposição efetiva	7.21766
Tempo de processamento	3 horas 55 minutos
Tempo de alinhamento	59 minutos e 5 segundos

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Alta
Pré-seleção de Pares	Genéricos
Limite máximo de pontos	40.000
Limite de ponto de amarração	4.000
Restringir recursos pela máscara	Não
Tempo de processamento	2 dias 5 horas

Nuvem de pontos densa**Parâmetros de reconstrução da nuvem de pontos**

Pontos	10,737,977
Qualidade	Alta
Filtragem de profundidade	Moderada
Tempo de processamento	2 dias 5 horas

ANEXO II - RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO MOSTEIRO DE MANCELOS



DADOS DO LEVANTAMENTO

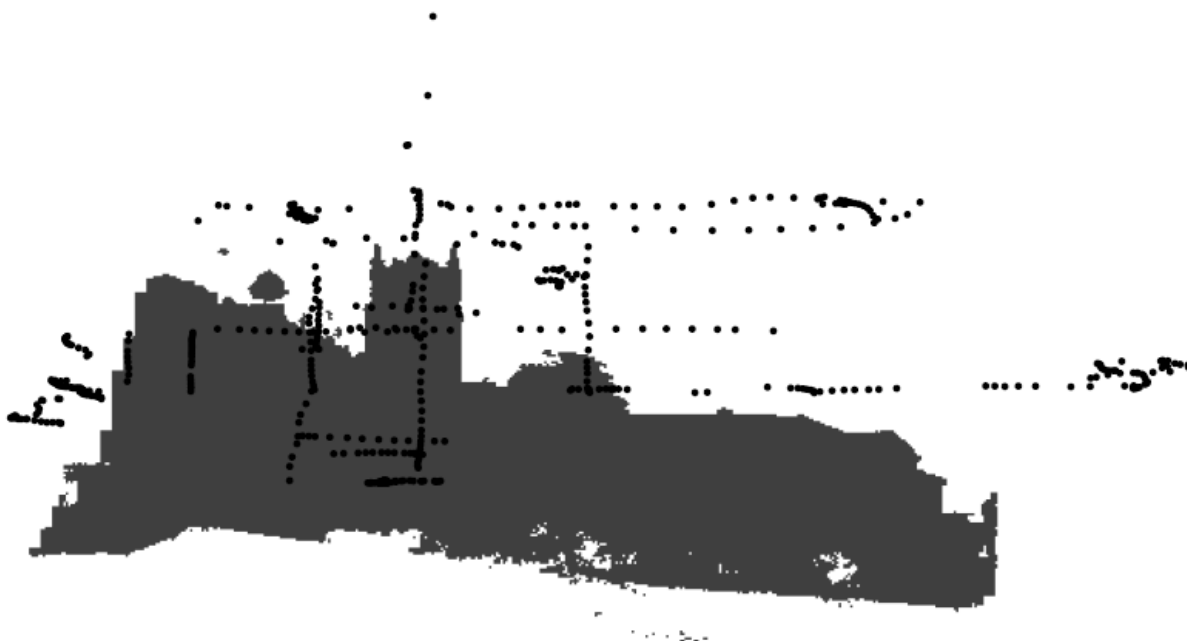


Figura A. 5: Localizações da câmara e sobreposições de imagem

Tabela A. 4: Características do levantamento

Número de Imagens	564
Altitude de voo	12.6 m
Resolução de solo	5.42 mm / pix
Área de cobertura	662 m ²
Estações da camara	564
Pontos de empate	234,518
Projeções	1.455,679
Erro de projeção	0.879 pix

Tabela A. 5: Características da camara fotográfica

Modelo da camara	Resolução	Comprimento focal	Tamanho do Pixel	Pré-calibrado
FC300X (3,61 mm)	4000 x 2250	3,61 mm	1.56 x 1.56 um	Não

CALIBRAÇÃO DA CAMARA

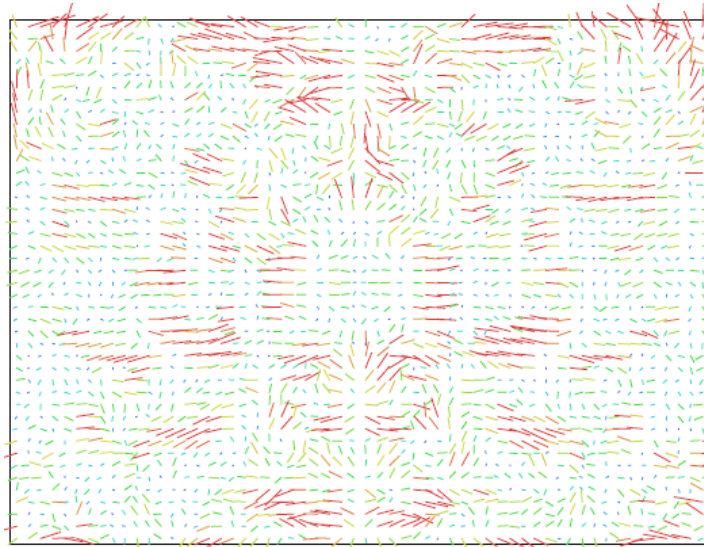


Figura A. 6: Resíduos de imagem para FC300X (3,61 mm)

LOCALIZAÇÕES DAS CAMARAS



Figura A. 7: Localizações de camara e erros estimados

Tabela A. 6: Erro do levantamento

Erro em X (m)	Erro em Y (m)	Erro em XY (m)	Erro em Z (m)	Erro total (m)
0.574806	0.423198	0.713792	1.05293	1.27207

ELEVAÇÃO DO MODELO DIGITAL

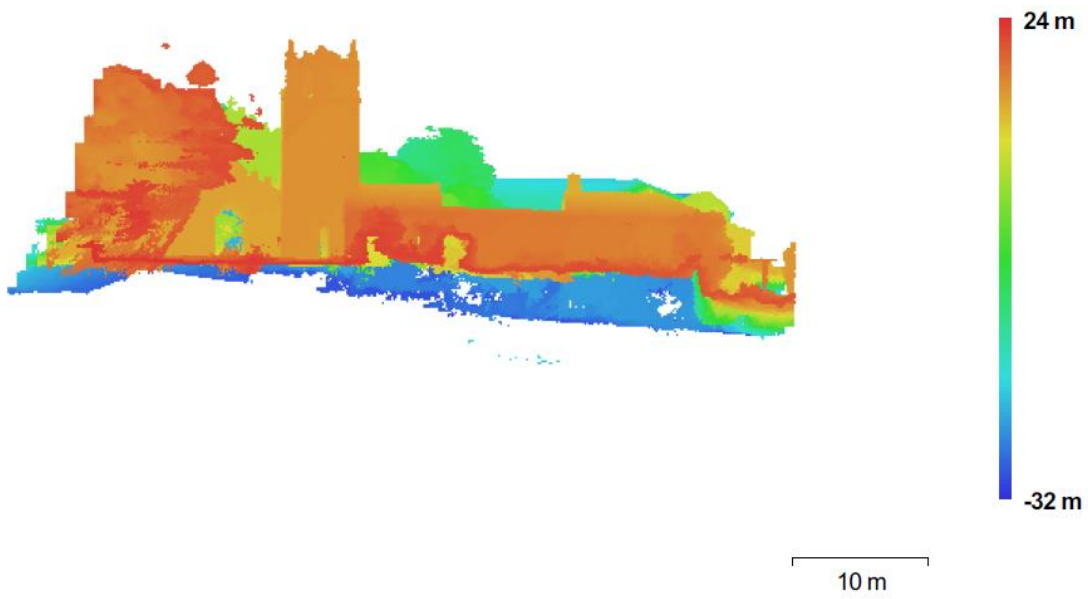


Figura A. 8: Modelo de elevação digital reconstruído

PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO**Geral**

Fotografias	564
Fotografias alinhadas	564
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)

Nuvem de pontos

Pontos	234,518 de 330,058
Erro de projeção	0.26387 (0.870737 pix)
Erro máximo de projeção	0.797429 (41.2863 pix)
Sobreposição efetiva	7.4059
Tempo de processamento	5 horas 8 minutos
Tempo de alinhamento	31 minutos e 31 segundos

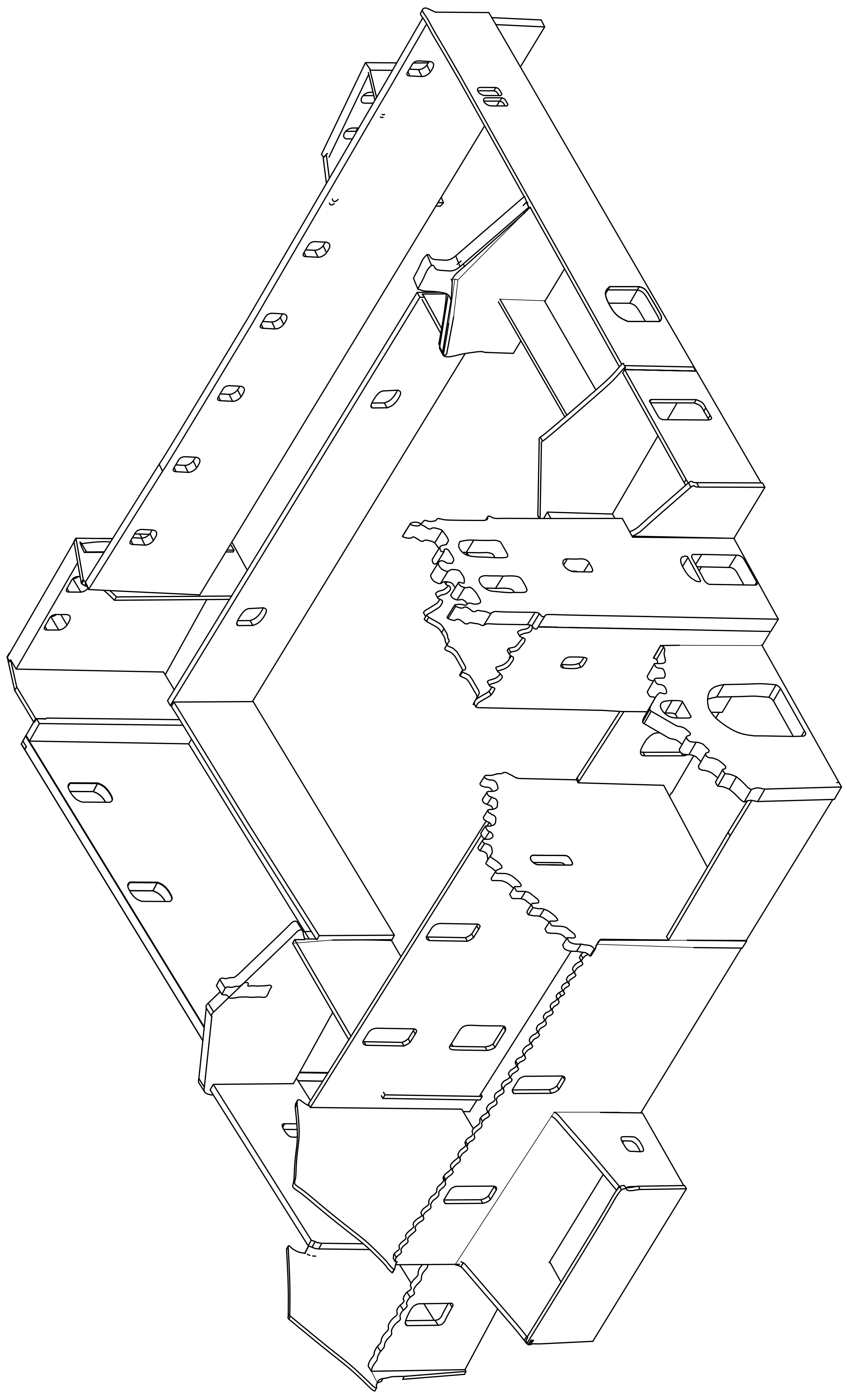
Parâmetros de alinhamento

Precisão	Alta
Pré-seleção de Pares	Genéricos
Limite máximo de pontos	40.000
Limite de ponto de amarração	4.000
Restringir recursos pela máscara	Não

Nuvem de pontos densa**Parâmetros de reconstrução da nuvem de pontos**

Pontos	63.872,819
Qualidade	Alta
Filtragem de profundidade	Moderada
Tempo de processamento	6 dias 20 horas

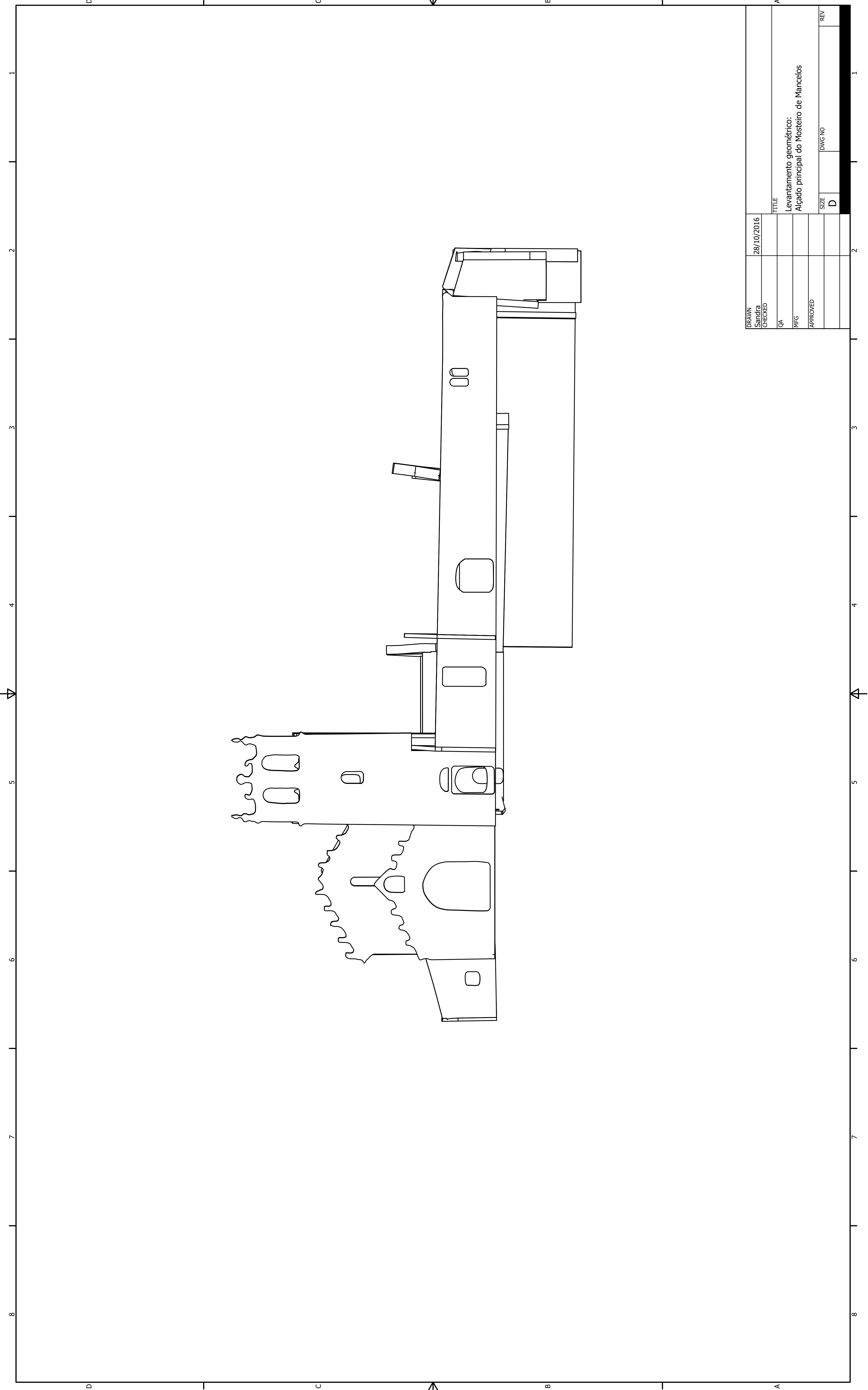
ANEXO III - PLANOS DOS LEVANTAMENTOS GEOMÉTRICOS



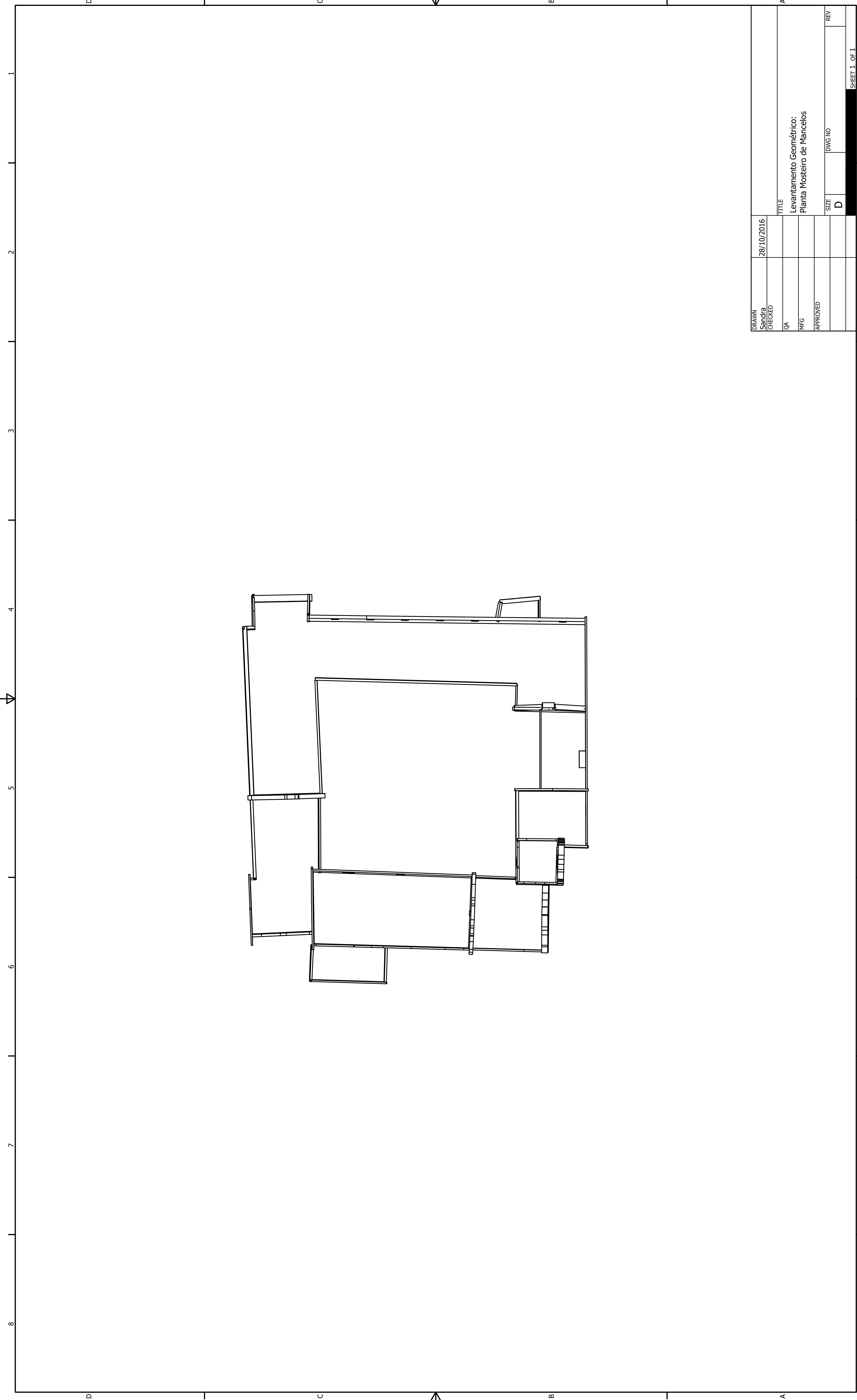
1 2 3 4 5 6 7 8

D C B A

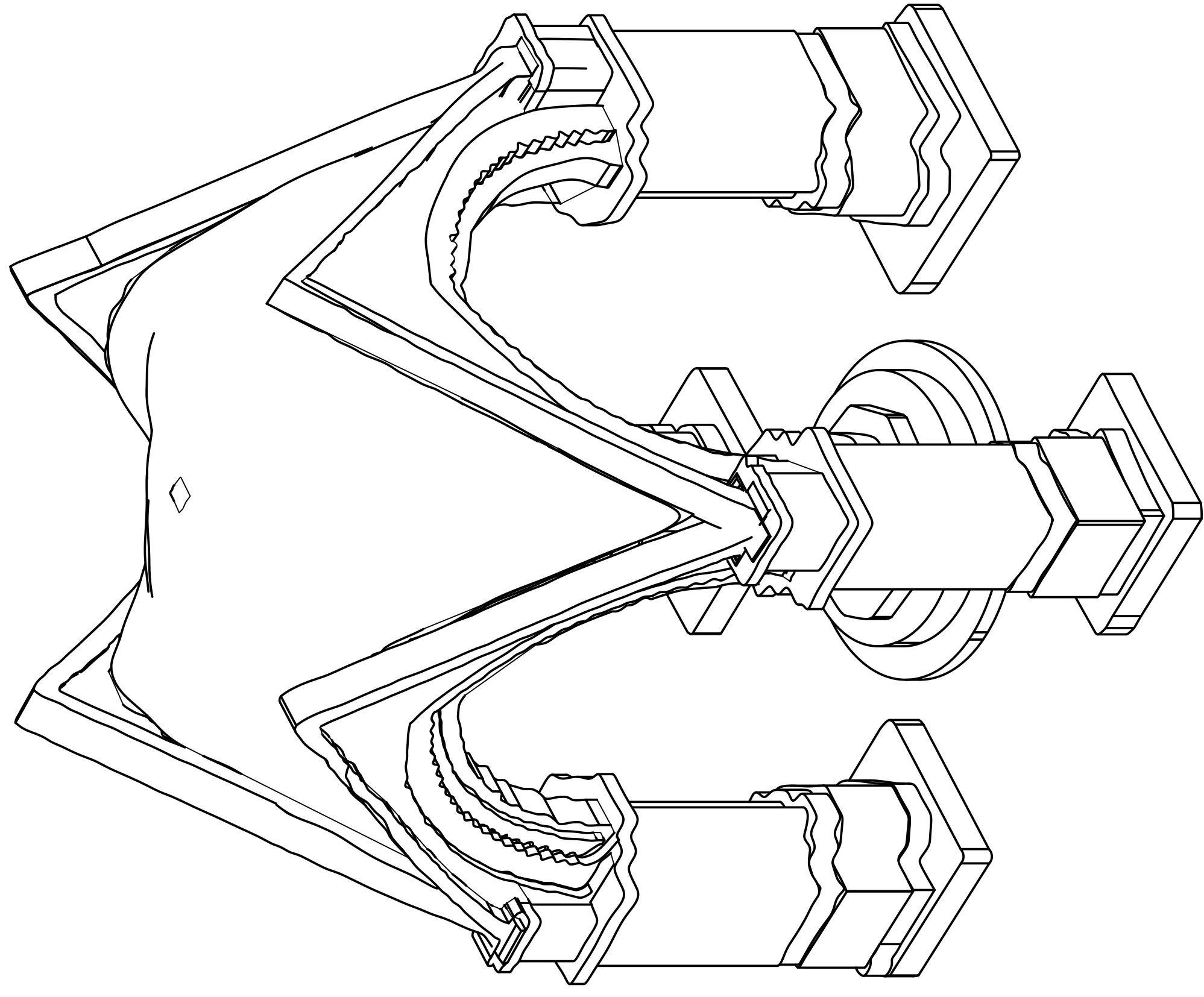
DRAWN Sandra	28/10/2016	TITLE	A
CHECKED		Levantamento geométrico: Perspetiva Mosteiro de Mancelos	
QA		SIZE	D
MTG		DWG NO	
APPROVED		REV	



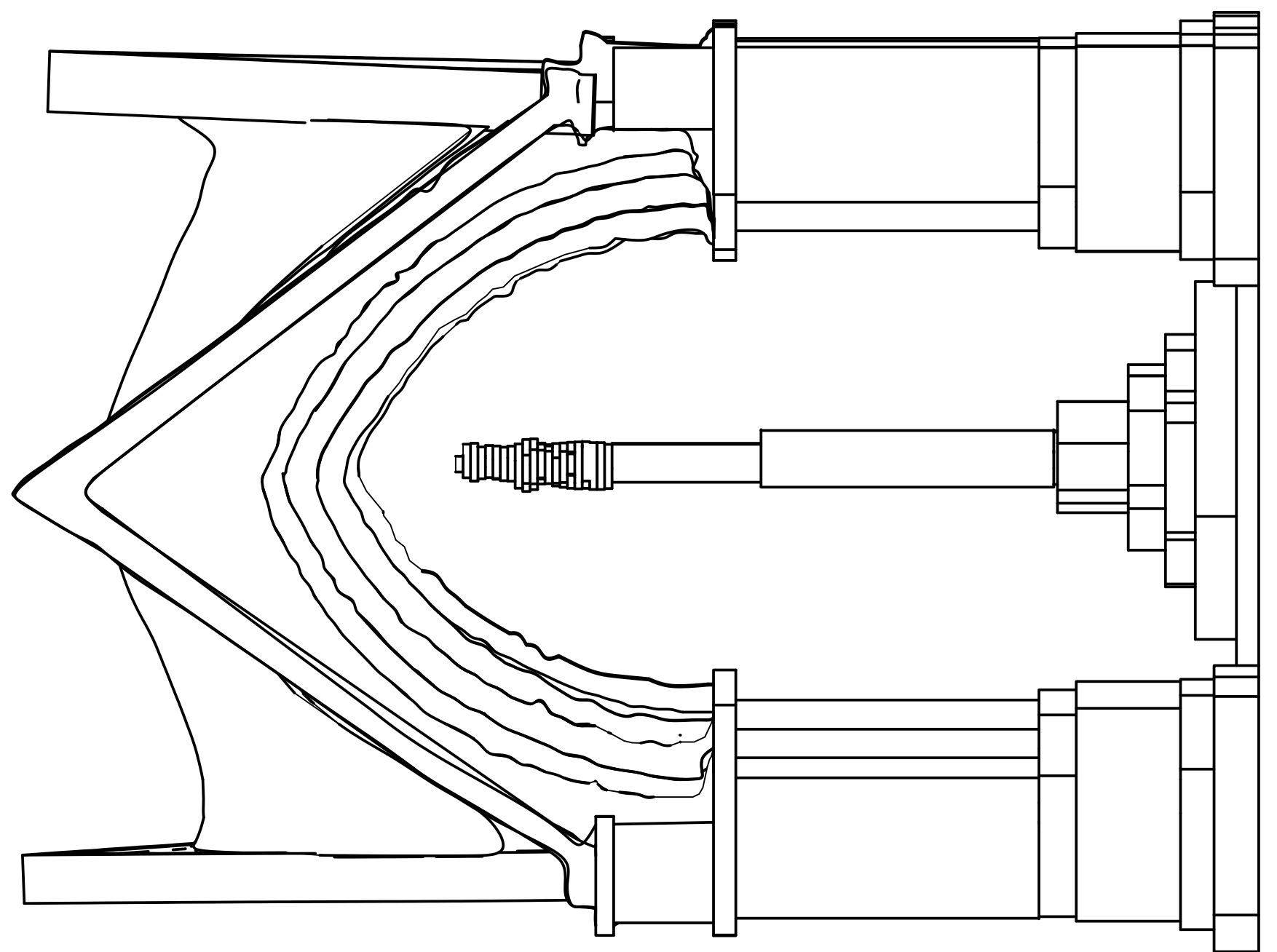
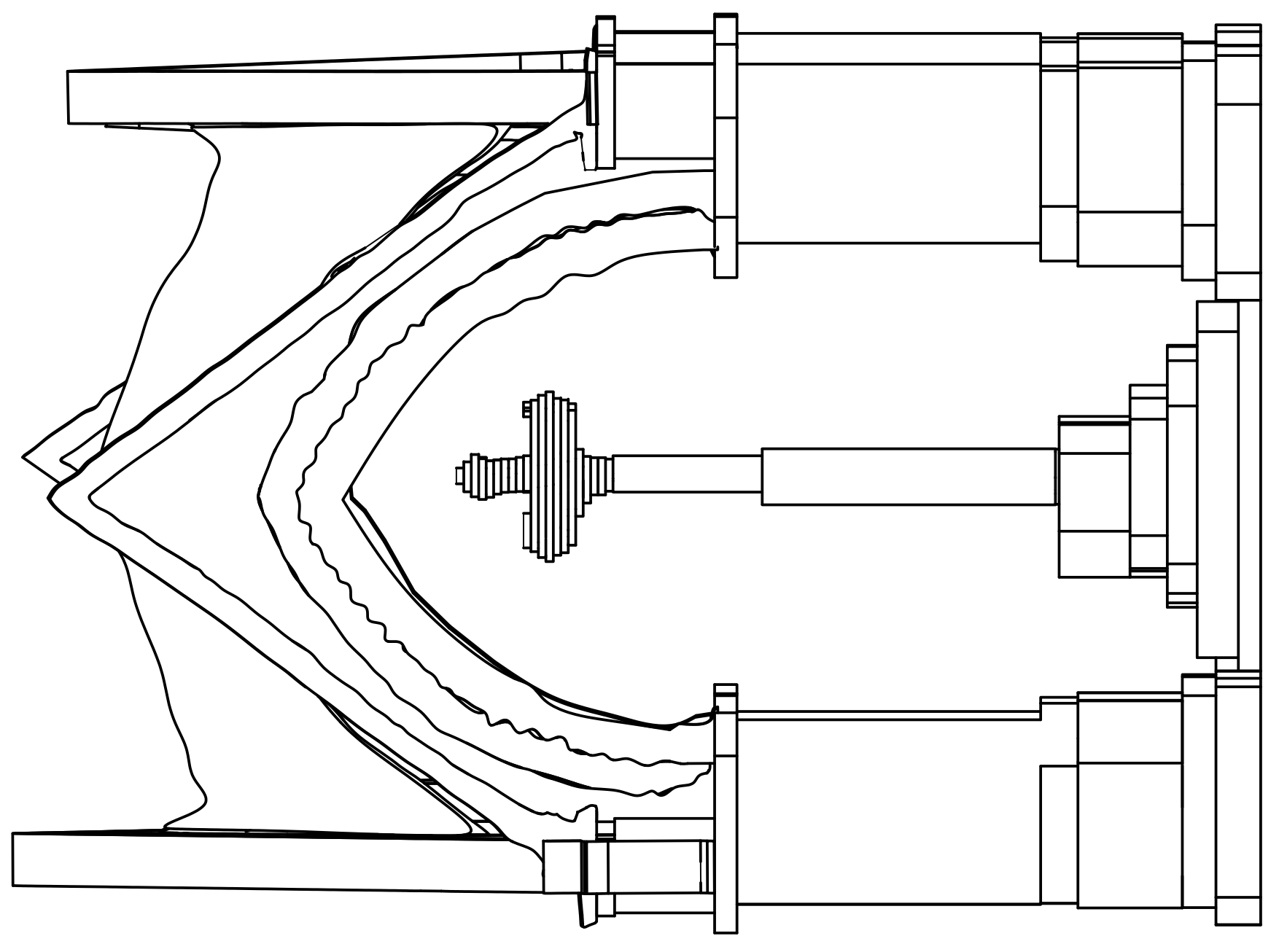
DRAWN Sandra	28/10/2016	TITLE	
CHECKED		Levantamento geométrico: Alçado principal do Mosteiro de Mancelos	
QA		SIZE	D
MTG		DWG NO	
APPROVED		REV	



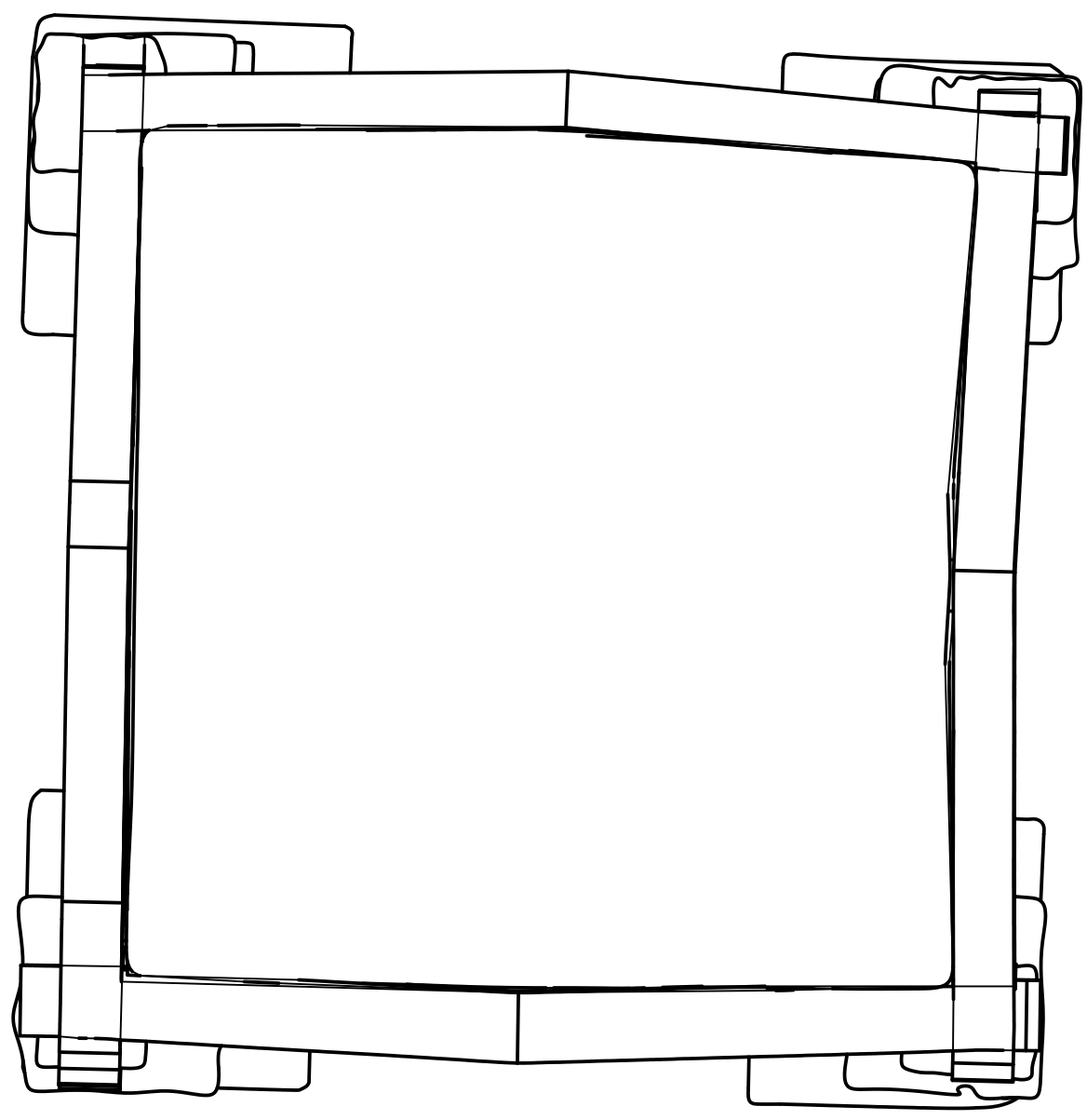
DRAWN	28/10/2016		TITLE	
Sandra			Levantamento Geométrico:	
CHECKED			Planta Mosteiro de Mancelos	
			SIZE	DWG NO
QA			D	
MTG				
APPROVED				REV



DRAWN Sandra	28/10/2016	TITLE
CHECKED		Levantamento geométrico: Perspetiva do Padrão do Salado
QA		SIZE
MTG		D
APPROVED		DWG NO
		REV



DRAWN Sandra	28/10/2016	TITLE	
CHECKED		Levantamento geométrico: Alçado principal e lateral do Padrão do Salado	
QA		SIZE	D
MFG		DWG NO	
APPROVED		REV	



DRAWN Sandra	28/10/2016		
CHECKED			
QA		TITLE	
MTG		Levantamento geométrico: Cobertura do Padrão do Salado	
APPROVED		SIZE	D
		DWG NO	
		REV	

SHEET 1 OF 1

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

D

C

B

A

D

C

B

A

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8