

# Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



## RESUMO

A fotogrametria é uma técnica que utiliza a fotografia como ponto de partida, tendo várias aplicações, como por exemplo, o levantamento topográfico de terrenos, edifícios e monumentos.

Nesta dissertação foi aplicada a técnica ao levantamento de edifícios e monumentos, em alternativa aos levantamentos tradicionais, onde todas as medições são obtidas manualmente.

Foram escolhidos uma fachada de um edifício e um monumento histórico da cidade de Viseu, cujos levantamentos foram realizados utilizando recursos correntes e disponíveis no Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. Utilizou-se, também, um programa informático desenvolvido especificamente para a fotogrametria.

Os levantamentos realizados geraram modelos 3D em *wireframe* (estrutura de arame) e com texturas. Após a retificação dos modelos, cotaram-se os desenhos, sendo possível efetuar medições dos elementos constituintes da fachada do edifício e do monumento.



## **ABSTRACT**

Photogrammetry is a technique that uses photography as a starting point, with various applications, such as surveying land, buildings and monuments.

In this dissertation the technique was applied to survey buildings and monuments, as an alternative to traditional surveys where all measurements are obtained manually.

It was chosen a building's facade and a monument from the city of Viseu, which surveys were carried out by using available resources in the Department of Civil Engineering of the School of Technology and Management of Viseu. It was also used a software developed specifically for photogrammetry.

The surveys generated 3D models in wireframe and textured. After rectifying the models, the drawings were dimensioned, allowing obtaining any measure.



## **PALAVRAS-CHAVE**

fotogrametria  
levantamento fotogramétrico  
edifícios antigos  
monumentos



## **KEY WORDS**

photogrammetry  
photogrammetric survey  
old buildings  
monuments



# ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
ÍNDICE DE QUADROS .....	xvii
ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xix
NOTAÇÃO.....	xxi
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos do trabalho.....	1
1.2 Estrutura do trabalho.....	2
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1 Câmara fotográfica .....	3
2.1.1 Breve história da origem da fotografia .....	4
2.1.2 Evolução: da câmara analógica à câmara digital.....	6
2.1.3 Funcionamento (alguns aspetos técnicos) .....	6
2.2 Fotogrametria.....	10
2.2.1 Primórdios e evolução da fotogrametria.....	10
2.2.2 Objetivos e aplicações .....	12
2.2.3 Fotogrametria aérea e terrestre .....	13
2.3 Conceitos importantes.....	14
2.3.1 Estereoscopia .....	14
2.3.2 Paralaxe estereoscópica .....	14
2.3.3 Marcas fiduciais e ponto principal.....	15
2.3.4 Orientação.....	16
2.3.5 Retificação .....	16
2.3.6 Restituição .....	17
2.4 Classificação da fotografia na fotogrametria .....	18
2.5 Tipo de câmara utilizada na fotogrametria .....	19
2.6 Observações finais .....	20

3.	Fundamentos da fotogrametria.....	21
3.1	Introdução.....	21
3.2	Fases de trabalho e metodologia .....	22
3.2.1	Fase de campo.....	22
3.2.2	Fase de gabinete .....	23
3.3	Matriz de rotação.....	23
3.4	Colinearidade.....	26
3.4.1	Ressecção espacial.....	29
3.4.2	Intersecção espacial.....	30
3.5	Coplanaridade.....	31
3.6	Coangularidade.....	32
4.	Equipamentos utilizados no desenvolvimento do trabalho.....	35
4.1	Equipamentos em fase de campo .....	35
4.2	Equipamentos em fase de gabinete (aplicações/programas informáticos).....	36
4.2.1	<i>PhotoModeler</i> .....	36
4.2.1.1	Erros de projeto.....	37
4.2.1.2	Calibração .....	38
4.2.1.3	Resultados da calibração pelo <i>PhotoModeler</i> .....	38
5.	Estudo-piloto.....	43
5.1	Procedimento e bases para os projetos .....	44
5.2	Projeto com câmara desconhecida .....	49
5.3	Projeto com câmara calibrada .....	50
5.3.1	Texturização do modelo.....	57
5.3.2	Revisão no <i>AutoCAD</i> .....	59
5.4	Cálculo dos ângulos de rotação (comparação com resultados do <i>PhotoModeler</i> )....	61
5.5	Observações finais.....	65
6.	Casos práticos .....	67
6.1	Fachada de um edifício antigo.....	67
6.1.1	Levantamento fotogramétrico .....	67
6.1.1.1	Trabalho em fase de campo .....	67
6.1.1.2	Trabalho em fase de gabinete .....	68
6.1.2	Resultados finais .....	72

6.2	Monumento histórico.....	74
6.2.1	Levantamento fotogramétrico.....	75
6.2.1.1	Trabalho em fase de campo.....	75
6.2.1.2	Trabalho em fase de gabinete.....	75
6.2.2	Resultados finais.....	78
6.3	Observações finais .....	81
7.	Conclusões.....	83
7.1	Considerações finais .....	83
7.2	Desenvolvimentos futuros .....	84
	REFERÊNCIAS .....	85
	APÊNDICE A- Retificação de imagem pelo <i>AutoCAD</i> e <i>GIMP</i> .....	91
	APÊNDICE B – Desenhos revistos resultantes do levantamento da fachada.....	95
	APÊNDICE C – Desenhos revistos resultantes do levantamento do monumento .....	99



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Exemplo de câmara escura. Extraído de Kodak, 2015 .....	4
Figura 2-2: <i>La Table Servie</i> . Extraído de Sougez (2001, p. 34) .....	4
Figura 2-3: <i>Point de vue du Gras</i> . Extraído de Sougez (2001, p. 33) .....	5
Figura 2-4: Primeiro daguerreótipo conhecido, de nome <i>L’atelier de l’artiste</i> (“O atelier do artista”), tirado em 1837. Extraído de Busselle (1979, p. 30) .....	5
Figura 2-5: Exemplo de câmara de daguerreótipo. Extraído de Os primos, 2015 .....	6
Figura 2-6: Funcionamento da câmara analógica. Extraído de Paranhos, 2014.....	7
Figura 2-7: Inversão de imagem projetada. Adaptado de Filho & Ruggiero (S.d.) .....	7
Figura 2-8: Relação distância focal – tipo de lente: a) lente fina, maior distância focal e b) lente espessa, menor distância focal. Adaptado de Busselle (1979) .....	8
Figura 2-9: Relação cobertura angular – distância focal. Extraído de CCM, 2015.....	8
Figura 2-10: Restituídor analógico. Extraído de Aerosat, 2015 .....	11
Figura 2-11: Restituídor analítico. Extraído de Ribeiro (2002, p. 6) .....	12
Figura 2-12: Fotografia aérea com marcas fiduciais. Extraído de Railano, 2014 .....	15
Figura 2-13: Localização das marcas fiduciais na câmara e determinação do ponto principal. Extraído de Brandalize (2004).....	15
Figura 2-14: Redução das coordenadas do ponto imagem <i>a</i> ao ponto principal. Extraído de Gonçalves (2005, p. 57).....	16
Figura 2-15: Exemplos de rectificação. Adaptado de Mateus (2010a) .....	17
Figura 2-16: Estéreo-restituição. Adaptado de Groetelaars (2004).....	17
Figura 2-17: Posições aconselhadas da câmara numa restituição a partir de várias fotografias: a) para uma largura menor e b) para uma largura maior. Adaptado de Santos (2003).....	18
Figura 2-18: Tipos de fotografia na fotogrametria aérea. Adaptado de Gonçalves (2005).....	18
Figura 2-19: Exemplos de câmaras métricas aéreas. Adaptado de Dos Santos (2013).....	19
Figura 3-1 Exemplo de fotografias com visualização de pontos condicionada por: a) sol e b) sombras.....	22
Figura 3-2: Rotação $\omega$ , em torno do eixo <i>X</i> . Adaptado de Gonçalves (2005).....	24
Figura 3-3: Rotação $\phi$ , em torno do eixo <i>y</i> . Adaptado de Gonçalves (2005) .....	24
Figura 3-4: Rotação $\kappa$ , em torno do eixo <i>z</i> . Adaptado de Gonçalves (2005).....	25
Figura 3-5: a) Rotação passiva e b) rotação ativa. Extraído de Silva (2014, p. 39) .....	26
Figura 3-6: Condição de colinearidade. Adaptado de Gonçalves (2005).....	27
Figura 3-7: Paralelismo entre o sistema de coordenadas no espaço-imagem e o sistema de coordenadas no espaço-objeto. Adaptado de Wolf (1983) citado em Pereira (2005) .....	27
Figura 3-8: Condição de coplanaridade. Extraído de Gonçalves (2005).....	31
Figura 3-9: Condição de coangularidade. Extraído de Grussenmeyer e Khalil (2002).....	33
Figura 4-1: Alvos codificados: a) RAD e b) alvo codificado não anelado.....	36
Figura 4-2: Sugestão de localização de um novo ponto na sua referenciação .....	37

Figura 4-3: Disposição das 12 folhas para a calibração.....	39
Figura 4-4: Fotografias utilizadas na calibração com contraste aumentado .....	39
Figura 4-5: Relatório de projeto da calibração.....	40
Figura 5-1: Exemplo de fotografias com sobreposição a) longitudinal e b) lateral .....	44
Figura 5-2: Valores, em metros, de largura e altura de porta, obtidos com fita métrica.....	44
Figura 5-3: Traçado de a) portas, b) janelas e c) pilar .....	45
Figura 5-4: Conjunto de 5 fotografias, utilizadas inicialmente.....	45
Figura 5-5: Exemplo do traçado dos contornos da fachada e juntas: a) lado esquerdo da fachada, b) lado direito da fachada e c) centro da fachada.....	46
Figura 5-6: Traçado da parte interior da fachada .....	46
Figura 5-7: Traçado dos pormenores das portas e janelas: a) porta central, b) janela 1, c) porta exterior do lado direito, d) porta exterior do lado esquerdo, e) janela 2 e f) porta na reentrância .....	47
Figura 5-8: Localização dos pontos de controlo em a) alçado e em b) planta.....	47
Figura 5-9: Sistema de eixos adotado para a fachada .....	48
Figura 5-10: Erro de processamento .....	49
Figura 5-11: Mensagem de processamento do projeto não calibrado.....	50
Figura 5-12: Modelo em estrutura de arame com área incompleta da fachada .....	50
Figura 5-13: Mensagem de processamento do projeto com 5 fotografias .....	51
Figura 5-14: Relatório do processamento do projeto com 5 fotografias.....	51
Figura 5-15: Pontos com baixo ângulo de separação entre si: a) foto B e b) foto C do mesmo pilar .....	52
Figura 5-16: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia A .....	53
Figura 5-17: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia B .....	54
Figura 5-18: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia C .....	54
Figura 5-19: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia D .....	54
Figura 5-20: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia E.....	54
Figura 5-21: Modelo da fachada em estrutura de arame do projeto com 5 fotografias .....	55
Figura 5-22: Mensagem de processamento do projeto com 54 fotografias .....	55
Figura 5-23: Relatório do processamento do projeto com 54 fotografias.....	56
Figura 5-24: Modelo da fachada em estrutura de arame do projeto com 54 fotografias: a) vista em perspectiva do lado esquerdo, b) vista em perspectiva do lado direito e c) vista em alçado .....	56
Figura 5-25: Fases da texturização do modelo: a) estrutura de arame inicial, b) sombreado (com superfícies) e c) texturização.....	57
Figura 5-26: Erro de interpretação causado por grelhador no local.....	57
Figura 5-27: Fotografia escolhida para a correção do erro causado por grelhador no local....	58
Figura 5-28: Correção resultante do erro causado por grelhador no local .....	58
Figura 5-29: Modelo da fachada texturizado: a) vista lateral esquerda, b) vista lateral direita e c) vista em alçado.....	59
Figura 5-30: Exemplo de porta revista e com detalhes completados: a) antes e b) depois.....	59

Figura 5-31: Correção de falha, assinalada a vermelho.....	60
Figura 5-32: Modelo da fachada revisto com algumas cotagens, em metros.....	60
Figura 5-33: a) Sistema de eixos inicial e b) Sistema de eixos pretendido. ....	62
Figura 6-1: Localização dos pontos de controlo na fachada .....	68
Figura 6-2: Medidas obtidas, em metros, com fita métrica: a) altura entre juntas de ombreira e b) largura de porta.....	68
Figura 6-3: Porta com reentrância arredondada .....	69
Figura 6-4: Mensagem de processamento final .....	69
Figura 6-5: Porta com reentrância redonda sombreada .....	70
Figura 6-6: Porta com reentrância redonda desenhada em <i>AutoCAD</i> .....	70
Figura 6-7: Exemplo de porta revista e com detalhes completados: a) antes e b) depois .....	71
Figura 6-8: Ligação da caleira lateral esquerda à superior .....	71
Figura 6-9: Representação de parte do telhado em a) alçado e em b) perfil .....	72
Figura 6-10: Modelo da fachada em estrutura de arame: a) vista em perspectiva do lado esquerdo, b) vista em alçado e c) vista em perspectiva do lado direito.....	72
Figura 6-11: Modelo da fachada texturizado.....	73
Figura 6-12: Modelo da fachada revisto com algumas cotagens, em metros.....	73
Figura 6-13: Medidas obtidas, em metros, com levantamento fotogramétrico: a) altura entre juntas de ombreira e b) largura de porta .....	74
Figura 6-14: Porta do Soar: a) lado da Rua Nunes Carvalho e b) lado do Largo Pintor Gata .	74
Figura 6-15: Medidas obtidas, em metros, com fita métrica: a) largura do arco para escala e b) medidas de uma das pedras do lado da Rua Nunes Carvalho para comparação com método fotogramétrico .....	75
Figura 6-16: Picagem dos pontos gerais no lado da Rua Nunes de Carvalho .....	76
Figura 6-17: Traçado do nicho onde se localiza a figura de São Francisco de Bórgia: a) picagem dos pontos e b) resultado em estrutura de arame.....	76
Figura 6-18: Traçado incompleto do nicho onde se encontra a figura de Santo António: a) picagem dos pontos e b) estrutura de arame.....	77
Figura 6-19: Aduelas fechadas, com linhas adicionadas realçadas a vermelho .....	77
Figura 6-20: Modelo do monumento em estrutura de arame visto do lado da Rua Nunes Carvalho: a) vista em perspectiva do lado esquerdo 1, b) vista em perspectiva do lado esquerdo 2, c) vista frontal, d) vista em perspectiva do lado direito 1 e e) vista em perspectiva do lado direito 2.....	78
Figura 6-21: Modelo do monumento em estrutura de arame visto do lado do Largo Pintor Gata: a) vista em perspectiva do lado esquerdo 1, b) vista em perspectiva do lado esquerdo 2, c) vista frontal, d) vista em perspectiva do lado direito 1 e e) vista em perspectiva do lado direito 2 .	78
Figura 6-22: Modelo do monumento texturizado visto do lado da Rua Nunes Carvalho: a) vista em perspectiva do lado esquerdo 1, b) vista em perspectiva do lado esquerdo 2, c) vista frontal, d) vista em perspectiva do lado direito 1 e e) vista em perspectiva do lado direito 2.....	79

Figura 6-23: Modelo do monumento texturizado visto do lado do Largo Pintor Gata: vista em perspectiva do lado esquerdo 1, b) vista em perspectiva do lado esquerdo 2, c) vista frontal, d) vista em perspectiva do lado direito 1 e e) vista em perspectiva do lado direito 2..... 79

Figura 6-24: Modelo do monumento corrigido em *AutoCAD* completo: a) vista em perspectiva do lado esquerdo do lado da Rua Nunes Carvalho, b) vista em perspectiva do lado direito do lado do Largo Pintor Gata, c) vista em perspectiva do lado direito do lado da Rua Nunes Carvalho e d) vista em perspectiva do lado esquerdo do lado do Largo Pintor Gata ..... 80

Figura 6-25: Modelo do monumento revisto: a) abóbada com envolvente do lado da Rua Nunes Carvalho e b) com envolvente do lado do Largo Pintor Gata..... 80

Figura 6-26: Medidas comparativas obtidas, em metros, pelo levantamento fotogramétrico . 81

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1: Relação cobertura angular – distância focal. Adaptado de Gonçalves (2005).....	8
Quadro 2-2: Comparação do tempo e custos gastos entre o método tradicional e o fotogramétrico. Adaptado de Yanaga (2006) .....	13
Quadro 2-3: Divisão da fotogrametria terrestre. Adaptado de Gonçalves (2005).....	14
Quadro 4-1: Resultados das calibrações .....	40
Quadro 4-2: Comparação dos valores do fabricante e valores determinado pela calibração ...	41
Quadro 5-1: Coordenadas dos pontos de controlo, obtidas pela estação total .....	48
Quadro 5-2: Coordenadas dos pontos de controlo, adaptadas para o sistema de eixos adotado .....	49
Quadro 5-3: Ângulos de rotação $\omega$ , $\phi$ e $\kappa$ em torno dos eixos X, Y e Z, respetivamente, das fotografias no projeto sem pontos de controlo .....	52
Quadro 5-4: Ângulos de rotação $\omega$ , $\phi$ e $\kappa$ em torno dos eixos X, Y e Z, respetivamente, das fotografias no projeto com pontos de controlo diretamente obtidos pela estação total.....	53
Quadro 5-5: Ângulos de rotação $\omega$ , $\phi$ e $\kappa$ em torno dos eixos X, Y e Z, respetivamente, das fotografias no projeto com pontos de controlo adaptados para o sistema de eixos adotado ....	53
Quadro 5-6: Coordenadas do centro de perspectiva, adaptadas para o sistema de eixos adotado .....	61
Quadro 5-7: Pontos de controlo utilizados em cada fotografia .....	61
Quadro 5-8: Redução final das coordenadas dos pontos de controlo, no espaço-imagem.....	63
Quadro 5-9: Valores dos ângulos de rotação, obtidos por resolução das equações de colinearidade.....	64
Quadro 5-10: Comparação entre os valores das coordenadas dos pontos de controlo determinados inicialmente e resultantes das equações de colinearidade, no espaço-imagem...	65
Quadro 6-1: Comparação de valores das medidas obtidas pelo método tradicional e pelo método fotogramétrico .....	81



## ABREVIATURAS E SIGLAS

ESTGV	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
DEC	Departamento de Engenharia Civil
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
MP	MegaPíxeis
POI	Parâmetros de Orientação Interna
POE	Parâmetros de Orientação Externa
S. d.	Sem data



## NOTAÇÃO

### a) Maiúsculas latinas

$X_C, Y_C, Z_C$	Coordenadas do centro de perspectiva
$X_P, Y_P, Z_P$	Coordenadas de um ponto no espaço-objeto
$L_s, A_s$	Largura e altura de sensor
$L_e, A_e$	Largura e altura de fotografia visualizada em ecrã de computador

### b) Minúsculas latinas

$f$	Distância focal
$x_c, y_c$	Coordenadas do ponto principal
$x_p, y_p$	Coordenadas de um ponto no espaço-imagem

### c) Minúsculas gregas

$\omega, \phi, \kappa$	Ângulos de rotação
$\omega_0, \phi_0, \kappa_0$	Aproximações iniciais dos ângulos de rotação



# 1. Introdução

Portugal é um dos países mais antigos da Europa, como tal é repleto de monumentos históricos, encontrando-se muitos em estados de degradação ou até mesmo destruídos total ou parcialmente. O mesmo é válido para edifícios antigos não sendo difícil encontrá-los, muitas das vezes, já inabitáveis.

A fotogrametria, que tem como origem as palavras gregas *phótos* (luz), *gramma* (descrição) e *metron* (medida), permite o estudo de qualquer objeto, em termos de forma, dimensões e posição através de fotografias (Valença, Júlio & Araújo, 2006), sendo ainda possível a reconstrução tridimensional do mesmo (Sampaio, 2007).

Esta técnica aplicada a um monumento ou edifício antigo pode ser uma importante ferramenta para a sua conservação e restauração/reabilitação.

## 1.1 Objetivos do trabalho

Com a realização deste trabalho pretende-se mostrar a possibilidade da aplicação da fotogrametria ao levantamento de fachadas de edifícios antigos e de monumentos com recurso a apenas uma câmara fotográfica comum e tripé e a um programa informático.

Tem-se também como objetivo criar bases de apoio relativas à técnica fotogramétrica para eventuais futuros trabalhos realizados no Departamento de Engenharia Civil da ESTGV.

## 1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho será estruturado do seguinte modo:

- Capítulo 1: apresenta a introdução e os objetivos da presente dissertação, bem como, um resumo dos capítulos seguintes;
- Capítulo 2: é apresentado um resumo da história da fotografia e das câmaras pioneiras, e descrito o funcionamento das câmaras atuais. É também neste capítulo que se introduz a fotogrametria e os diversos conceitos relacionados com a técnica;
- Capítulo 3: apresentam-se as bases teóricas utilizadas na fotogrametria;
- Capítulo 4: refere-se todo o equipamento utilizado durante o trabalho prático. É também neste capítulo que se dá a conhecer o programa *PhotoModeler* e explicado o seu funcionamento. É explicada, também, a calibração da máquina fotográfica e expressos os resultados da mesma;
- Capítulo 5: diz respeito ao estudo-piloto. O objetivo deste estudo foi experimentar e aprender o funcionamento do *PhotoModeler*. São aplicados os fundamentos da fotogrametria apresentados no Capítulo 3.
- Capítulo 6: neste capítulo encontram-se os dois casos práticos realizados;
- Capítulo 7: neste último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas da elaboração do trabalho e sugeridos alguns desenvolvimentos futuros.

## **2. Revisão bibliográfica**

Na revisão bibliográfica são dadas breves noções da história, da evolução e do funcionamento da câmara fotográfica. É feita uma introdução à fotogrametria, onde se explica, o que é a fotogrametria, quais os seus objetivos, como surgiu e como evoluiu.

São ainda abordados alguns conceitos relacionados com a fotogrametria, para melhor entendimento da utilização da técnica, a classificação da fotografia na fotogrametria e quais os tipos de câmara fotográfica que se podem utilizar.

### **2.1 Câmara fotográfica**

A fotografia é criada através de duas etapas: a projeção de imagem e a gravação da mesma. O modo como uma imagem é projetada relaciona-se com o funcionamento da câmara escura que consiste numa caixa fechada de paredes internas opacas e pretas, encontrando-se numa das paredes um orifício por onde entra a luz projetando uma imagem na parede oposta.

A técnica da gravação de imagem foi desenvolvida mais de dois milénios após a descoberta da câmara escura. O processo foi inicialmente designado por heliografia e daguerreótipo antes de ser chamado de fotografia.

Nos parágrafos seguintes é descrito, resumidamente, como a câmara escura progrediu para a câmara fotográfica digital e apresentados alguns aspetos do seu funcionamento.

### 2.1.1 Breve história da origem da fotografia

No século V a.C., o filósofo chinês Mo-Ti descreveu o Princípio da Câmara Escura quando observou o modo como os raios de luz projetavam uma imagem invertida, ao atravessarem um pequeno orifício num quarto escuro (Fragoso, 2004).

O mesmo princípio foi também estudado no século IV a. C. por Aristóteles, que observou que quanto mais fechada a abertura por onde passava a luz, mais nítida se tornava a imagem projetada (Fraga & Zingano, 2015). Contudo, por haver menos luz a entrar, a imagem ficava bastante escurecida, ao que Girolamo Cardano sugeriu, em 1550, que fosse utilizada uma lente biconvexa no orifício, formando assim imagens mais nítidas e vivas (Wayne, 2013).

À semelhança do que acontece no olho humano, em que a imagem projetada na retina se encontra invertida, também na câmara escura ocorre uma inversão de imagem quando projetada. No caso do olho, é o cérebro que permite que vejamos as imagens corretamente. Para a câmara escura a solução encontrada foi a colocação de espelhos, como se pode observar na Figura 2-1 (Snyder, 2015).

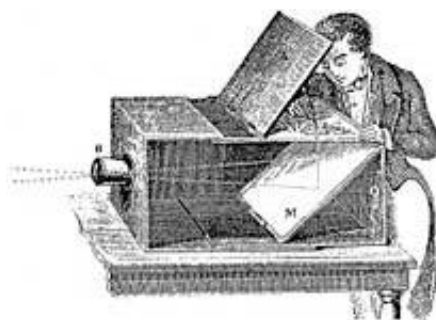


Figura 2-1: Exemplo de câmara escura. Extraído de Kodak, 2015

O estudo da possibilidade de gravar definitivamente as imagens através da luz foi iniciado por Joseph Nicéphore Niépce, por volta de 1813, recorrendo a uma câmara escura (Sougez, 2001) e dando à sua descoberta o nome de heliografia, que deriva das palavras gregas *helios* (sol) e *graphis* (escrita).

A sua primeira heliografia data de 1822 que consiste numa natureza morta, de nome *La Table Servie* (“A Mesa Servida”) representada na Figura 2-2. A imagem foi gravada com uma substância à base de verniz de asfalto, denominada betume da Judeia, aplicada sobre vidro.

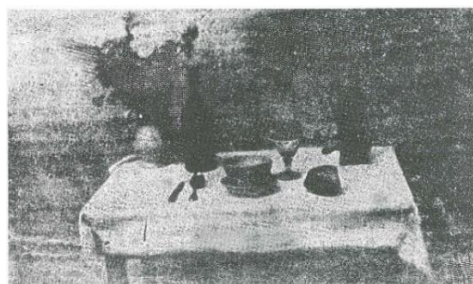


Figura 2-2: *La Table Servie*. Extraído de Sougez (2001, p. 34)

Com a fotografia original desaparecida, sendo hoje conhecida apenas por uma cópia (Sougez, 2001), a fotografia mais antiga de que há registo é de 1826, tendo como nome *Point de vue du Gras* (“Vista de Gras”), retratada na Figura 2-3.

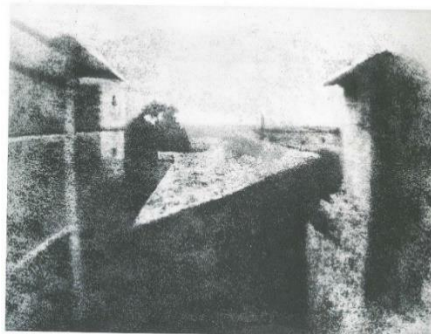


Figura 2-3: *Point de vue du Gras*. Extraído de Sougez (2001, p. 33)

Embora tenha sido uma importante descoberta, a heliografia era considerada inadequada por necessitar de um tempo de exposição (conceito explicado no parágrafo 2.1.3) de cerca de 8 horas (Busselle, 1979).

Após se associar a Niépce para o aperfeiçoamento da técnica da heliografia, Louis-Jacques M. J. M. Daguerre acabou por desenvolver, em 1835, a sua própria técnica, o daguerreótipo cujo tempo de exposição era de 15 a 30 minutos (Busselle, 1979). O daguerreótipo consistia na utilização de chapas de cobre revestidas com prata, submetidas a vapores de iodo e expostas à ação do mercúrio e mergulhadas numa solução aquecida de sal de cozinha (Busselle, 1979).

O primeiro daguerreótipo conhecido data de 1837 (Figura 2-4).



Figura 2-4: Primeiro daguerreótipo conhecido, de nome *L'atelier de l'artiste* (“O atelier do artista”), tirado em 1837. Extraído de Busselle (1979, p. 30)

Na Figura 2-5 apresenta-se um exemplo de uma câmara de daguerreótipo.

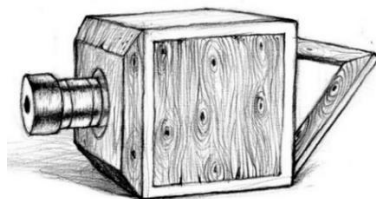


Figura 2-5: Exemplo de câmara de daguerreótipo. Extraído de Os primos, 2015

Em 1839 foi empregado pela primeira vez o termo fotografia, por John Herschel, (Universidade Católica Portuguesa, 2015) que tem como origem as palavras gregas *phótos* (luz) e *graphis* (escrita).

Em 1841, quase simultaneamente a Daguerre, o inglês William Henry Fox Talbot patenteou uma forma de registar imagens em papel com cloreto de prata, em vez de chapas, formando uma imagem negativa (Silvestro, 2009). A sua invenção permitia a cópia da imagem original (Fraga & Zingano, 2015), pois ao emulsionar o negativo com outra folha de papel era conseguida uma imagem positiva (Silvestro, 2009).

Em 1851, Frederick Scott Archer inventou um método para fixar a emulsão em chapas de vidro, aumentando a qualidade da imagem, por ser um material transparente (Silvestro, 2009).

Em 1861 foi tirada a primeira fotografia a cores pelo físico James Clerk Maxwell (Pelosi, 2008). George Eastman, em conjunto com William Walker, inventou o primeiro filme fotográfico, em 1885 (Utterback, 1995).

### **2.1.2 Evolução: da câmara analógica à câmara digital**

Em 1888, Eastman fundou a conhecida empresa Kodak, criando a primeira câmara de filme (Britannica, 2015).

Em 1904, os irmãos Lumière patentearam o processo de autocromo (Antman, 2007), um processo de fotografia colorida.

O primeiro protótipo de câmara sem filme foi construída também pela Kodak, em 1975, cujas fotografias eram tiradas a preto e branco (Campanholi, 2014). A câmara pesava quase 4 kg e tinha uma resolução de 0,01 Megapíxeis (MP) (Yoo, Lyytinen, Thummadi & Weiss, 2010).

Na década de 90, o rápido desenvolvimento das câmaras digitais contribuiu para que estas ganhassem cada vez mais prestígio, levando a que nos dias de hoje, a utilização de uma câmara analógica seja quase uma raridade.

### **2.1.3 Funcionamento (alguns aspetos técnicos)**

O funcionamento da câmara, seja analógica ou digital, é baseado no Princípio da Câmara Escura (Figura 2-6), descrito no parágrafo 2.1, e no Princípio da Propagação Retilínea da Luz, que diz que a luz se propaga em linha reta num meio homogéneo e transparente (Silva, 2016).

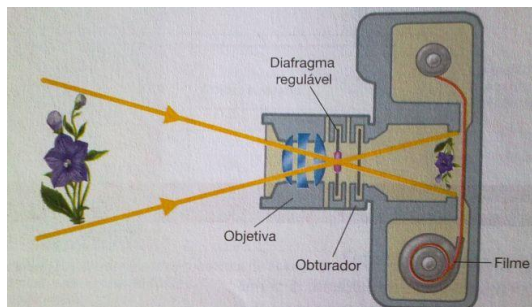


Figura 2-6: Funcionamento da câmara analógica. Extraído de Paranhos, 2014

Como mencionado no parágrafo 2.1.1, os raios de luz ao atravessar uma lente formam uma imagem ( $I$ ) invertida do objeto ( $O$ ). Numa lente biconvexa há dois pontos de foco ( $F$  e  $F'$ ), um de cada lado da lente. A Figura 2-7 apresenta um exemplo, onde  $o$  é distância do objeto ao centro da lente,  $i$  é a distância da imagem ao centro da lente e  $f$  é a distância focal, que consiste na distância, medida em mm, entre o centro da lente e o ponto de convergência dos raios paralelos incidentes na lente (foco), isto é, a distância entre o centro da lente e o filme/sensor.

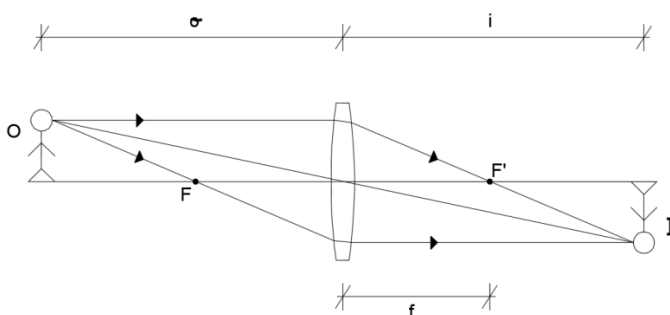


Figura 2-7: Inversão de imagem projetada. Adaptado de Filho & Ruggiero (S.d.)

A distância focal depende da espessura da lente (Figura 2-8) e influencia a cobertura angular: quanto maior a distância focal, menor será a cobertura angular (área) a ser fotografada (Figura 2-9).

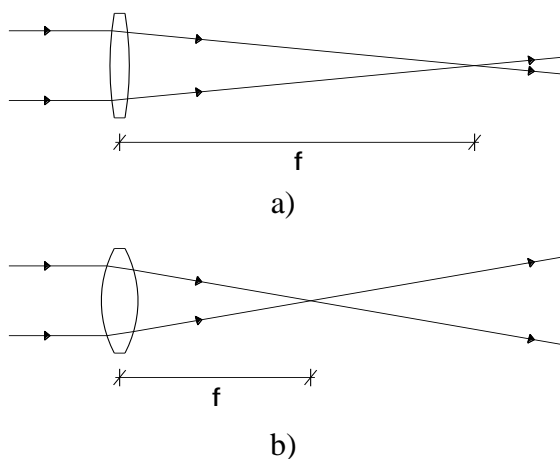


Figura 2-8: Relação distância focal – tipo de lente: a) lente fina, maior distância focal e b) lente espessa, menor distância focal. Adaptado de Busselle (1979)

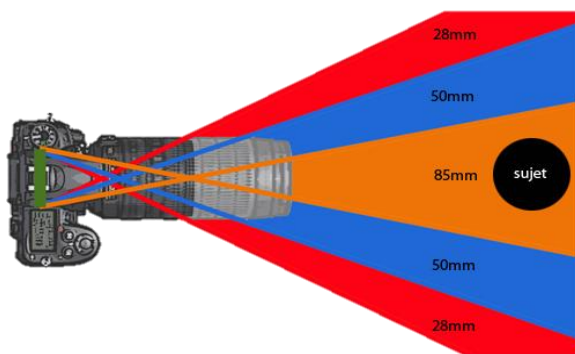


Figura 2-9: Relação cobertura angular – distância focal. Extraído de CCM, 2015

No Quadro 2-1 (adaptado de Gonçalves, 2005) encontram-se as relações correntes entre a cobertura angular e a distância focal;

Quadro 2-1: Relação cobertura angular – distância focal. Adaptado de Gonçalves (2005)

Cobertura angular	Distância Focal [mm]
Pequena angular (10° - 20°)	610 – 915
Angular normal (50° - 75°)	210 – 300
Grande angular (85° - 95°)	≈ 153
Super grande angular (110° - 130°)	≈ 88

A distância focal é calculada pela seguinte expressão (Brito & Coelho, 2007):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o} \quad (2-1)$$

O que distingue a câmara analógica da câmara digital é a projeção da imagem e o armazenamento da fotografia. Na câmara analógica, a imagem é projetada e armazenada num filme fotográfico, enquanto na câmara digital a imagem é projetada num sensor e armazenada, por exemplo, num cartão de memória.

O sensor de uma câmara digital pode ser do tipo *Charge-Coupled Device* (CCD) (dispositivo de carga acoplada) ou *Complementary Metal-Oxide Semiconductor* (CMOS) (semicondutor de óxido metálico complementar). Ambas as tecnologias têm como função converter a luz recebida em eletrões. Distinguem-se pelo preço e qualidade de imagem: o CCD gera imagens mais nítidas e menos suscetíveis a ruído (interferência na fotografia que causa o aparecimento de pontinhos de cores e brilhos aleatórios, não correspondentes à realidade fotografada) enquanto a imagem criada pelo CMOS tem resolução limitada. Contudo, o CMOS é mais barato que o CCD e consome cerca de 100 vezes menos energia.

Um termo bastante conhecido por quem usa câmaras digitais é a resolução. A designação “correta” para a resolução é *Pixels Per Inch* (PPI, píxeis por polegada) se o objeto em questão é visualizado num monitor/ecrã. Se for visualizado em papel, designa-se por *Dots Per Inch* (DPI, pontos por polegada).

O termo píxel deriva da junção de *picture* (imagem) e *element* (elemento). Para a formação de imagem, é atribuída a cada píxel uma cor do sistema RGB (*Red Green Blue*, Vermelho Verde Azul).

Os píxeis definem a dimensão da imagem, largura por altura; se uma câmara tira fotografias com 2048 píxeis de largura e 1536 píxeis de altura, terá então uma resolução de 3 MP (2048 × 1536 = 3145728 píxeis).

Para melhor compreensão do funcionamento da câmara, analógica e digital, serão a seguir descritas algumas propriedades e conceitos importantes:

- **Objetiva:** é a parte mais importante da câmara. Consiste num dispositivo composto por um conjunto de lentes cujo objetivo é ajustar o foco, enquadramento, alcance e qualidade ótica da imagem;
- **Diafragma:** controla a quantidade de luz que entra na objetiva. Geralmente é constituído por lâminas finas que se abrem a partir do centro, podendo a abertura ser controlada quando se aciona o botão disparador. Um diafragma mais aberto significa que deixa passar mais luz do que um diafragma mais fechado. O tamanho da abertura é indicado em números-*f*, cuja escala universal segue uma progressão geométrica composta pelos valores 1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; 32; 45; 64. Na escala, um número-*f* corresponde a metade da luz do número-*f* anterior, por exemplo, a luz que entra em *f*/5,6 é a metade da luz que entra em *f*/4 e o dobro da luz que entra em *f*/8;
- **Profundidade de campo:** depende da abertura do diafragma. A profundidade de campo é a zona de nitidez entre o ponto em foco e os pontos envolventes, o que significa que numa fotografia se um objeto estiver bem nítido e o seu fundo desfocado, tem pouca

- profundidade de campo. Já uma fotografia que esteja nítida em quase toda a sua totalidade tem muita profundidade de campo;
- Obturador: sistema, localizado atrás do diafragma, que controla o tempo de entrada da luz na câmara, como uma “cortina” que se encontra fechada e abre no momento em que se aciona o botão disparador. O tempo de abertura do obturador é designado por velocidade de obturação ou tempo de exposição, cuja medida é dada em fração de segundos, sendo os valores comuns 1 s; 1/2 s; 1/4 s; 1/15 s; 1/60 s; 1/125 s; 1/250 s; 1/500 s; 1/1000 s; 1/2000 s; 1/4000 s; 1/8000 s;
  - Sensibilidade do filme/sensor ou sensibilidade ISO (*International Organization for Standardization*, Organização Internacional de Normalização): mede a sensibilidade do filme/sensor à luz, sendo atualmente nas câmaras digitais medida pela escala recomendada na norma ISO 12232:2006 (ISO, 2015). Geralmente, utiliza-se uma ISO mais baixa para situações com boas condições luminosas e vice-versa, dado que quanto mais elevado o valor da ISO, maior é a sensibilidade à luz (mais luz é capturada). No entanto, é preciso uma especial atenção no manuseio da câmara com a opção de ISO num valor elevado, pois nessa situação as fotografias poderão apresentar bastante ruído. A designação ISO é equivalente à antiga sigla ASA (*American Standards Association*, Associação Americana de Padrões).

## 2.2 Fotogrametria

### 2.2.1 Primórdios e evolução da fotogrametria

A fotogrametria começou a dar os seus primeiros passos em 1851 com Aimé Laussedat, que denominou a técnica de Metrofotografia (Ahmed & Haas, 2010). Em 1858, a fotogrametria passou a ser desenvolvida simultaneamente por Laussedat, que conseguiu obter levantamentos exatos de edifícios (plantas e alçados) e de pequenas áreas de terreno (Gomes, 2013) e por Albrecht Meydenbauer que, após ter tido um acidente ao realizar medições numa catedral, ocorreu-lhe substituir as medições diretas da fachada por medições indiretas em fotografias (Albertz, 2002). Em 1867, num artigo publicado por Meydenbauer, foi utilizado pela primeira vez o termo fotogrametria, que acabou por ser aceite mundialmente (Albertz, 2002).

Em 1889 o alemão Carl Koppe publicou o primeiro livro sobre a técnica, de nome *Manual de fotogrametria* (Brito & Coelho, 2007).

No ano de 1901, o físico alemão Carl Pulfrich inventa o aparelho estereocomparador, aparelho utilizado por astrónomos que permitia a observação das diferenças entre fotografias tiradas no céu noturno (Brito & Coelho, 2007). Este foi um importante passo para a história da fotogrametria, pois passou a ser possível utilizarem-se fotografias estereopares, ou seja, fotografias observadas estereoscopicamente. Brito e Coelho (2007, p. 19) afirmam que a invenção do estereocomparador “marcou a primeira revolução da fotogrametria” pois facilitou

significativamente o trabalho dos fotogrametristas, pela extinção dos vários cálculos matemáticos até então necessários, nascendo assim a fotogrametria analógica.

Em 1904, Theodor Scheimpflug inventou uma câmara que se tornou num importante equipamento para a retificação. A câmara era constituída por sete lentes oblíquas agrupadas em torno de uma lente central a ser utilizada a partir de balões (Luhmann, 2004). Scheimpflug registou, também, a patente de um método de retificação, hoje conhecido por Princípio de Scheimpflug que descreve uma condição ótica que permite a documentação de um objeto inclinado com a máxima profundidade de campo e mínima distorção de imagem (Wegener & Laser-Junga, 2009).

Surgiram os primeiros retificadores analógicos, que acabaram por ser mais tarde substituídos pelos restituidores analógicos (Figura 2-10) cujo objetivo era permitir a visão estereoscópica.



Figura 2-10: Restituidor analógico. Extraído de Aerosat, 2015

A fotogrametria aérea foi amplamente utilizada entre 1918 e 1945 na criação de mapas, especialmente na 2ª Guerra Mundial (Ghosh, 2005).

De acordo com Ribeiro (2002, p. 4), a fotogrametria analógica “é responsável pela maior parte dos mapas topográficos existentes no mundo inteiro”. Em Portugal, a cartografia é da responsabilidade do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE) (Centro de Informação Geospacial do Exército, 2013), fundada com a designação de Aula de Fortificação e Arquitetura Militar.

Nos anos 40, com a invenção dos computadores, todo o processo da técnica fotogramétrica foi facilitado. Em 1953, Helmut Schmidt iniciou um estudo (onde se incluía o tratamento matricial, as soluções por mínimos quadrados, a solução simultânea utilizando múltiplas imagens e uma análise completa de propagação de erros) que acabou por estabelecer as bases da fotogrametria analítica (Brito & Coelho, 2007).

O finlandês Uki Helava desenvolve, em 1957, o restituidor analítico (Figura 2-11), tornando-se num importante marco para a fotogrametria, já que permitia a medição de coordenadas das marcas fiduciais de pontos homólogos (pontos coincidentes em duas fotografias) nas imagens. Assim, era envolvido menos trabalho humano e verificava-se uma maior precisão nos resultados finais (Brito & Coelho, 2007).

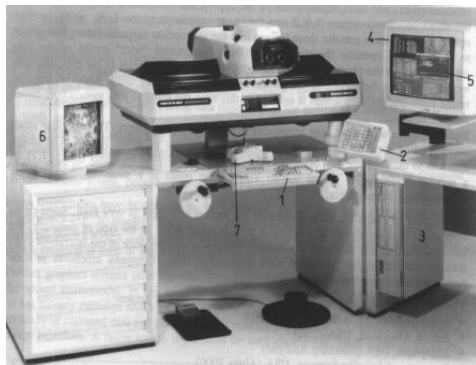


Figura 2-11: Restituídor analítico. Extraído de Ribeiro (2002, p. 6)

Por fim, a fotogrametria evoluiu para a fotogrametria digital, graças à invenção da câmara digital. Na fotogrametria digital as fotografias podem ser obtidas por uma câmara analógica e posteriormente digitalizadas com um *scanner* ou por uma câmara digital.

### 2.2.2 Objetivos e aplicações

A fotogrametria tem como objetivo a reconstrução de um objeto tridimensional a partir de imagens bidimensionais (Brito & Coelho, 2007) para posterior obtenção de informação métrica e descritiva do objeto em causa (Rezende, 2009).

Uma das grandes vantagens da fotogrametria é a possibilidade de se obter qualquer medição sem serem necessárias repetidas deslocações ao local de estudo e, mais importante, sem colocar a integridade física em risco no caso de levantamentos a elevadas alturas. Assim, uma tarefa que poderia demorar dias a ser executada com o levantamento tradicional (onde todos os pormenores construtivos teriam de ser medidos manualmente) acaba por levar algumas horas a ser concluída. Um exemplo encontra-se no Quadro 2-2 de Yanaga (2006) que faz a comparação do tempo despendido e do custo estimado entre o levantamento fotogramétrico e o levantamento tradicional.

Quadro 2-2: Comparação do tempo e custos gastos entre o método tradicional e o fotogramétrico. Adaptado de Yanaga (2006)

Método	Objeto levantado	Tempo de medição	Tempo de retificação	Tempo de desenho em <i>AutoCAD</i>	Nº de visitas ao local	Total de tempo gasto	Custo estimado por hora
Tradicional	Esquadria (janela da nave)	6h	0	4h	3	10h	201,03 €
Fotogramétrico		15min	20min	35min	1	1h15min	25,13 €
Tradicional	Porta principal	9h	0	7h	4	16h	321,65 €
Fotogramétrico		15min	20min	2h	1	2h45min	55,28 €
Tradicional	Fachada principal	15h	0	10h	7	25h	502,76 €
Fotogramétrico		45min	20min	5h10min	1	6h15min	125,64 €

Além de ser uma técnica muito utilizada em engenharia, por exemplo no controlo de deformação de elementos estruturais (Valença *et al.*, 2006; Gomes, 2013), e na arquitetura (Mateus, 2010b), é também bastante útil na astronomia (Conrod, 1963; Rozenblyum, 1959), arqueologia (Rami, 2012; Prins & Adams, 2012; Kucukkaya, 2004), cartografia (Albertz *et al.*, 2005) e, ainda, na medicina (Tokarczyk & Mikrut, 2000; Mitchell, 1995). Está, ainda, a começar a ser bastante utilizada no desenvolvimento de mundos virtuais, restituindo os seus objetos e cenários constituintes (Coelho, 2000).

### 2.2.3 Fotogrametria aérea e terrestre

Dependendo do modo como se obtém as fotografias, a fotogrametria pode ser aérea ou terrestre. Na fotogrametria aérea, as câmaras são acopladas a aviões para o efeito. Antes da invenção do avião, as fotografias aéreas eram obtidas a partir de balões.

No caso da fotogrametria terrestre, as fotografias são tiradas com a câmara localizada no terreno, preferencialmente apoiada num tripé.

A fotogrametria terrestre pode ainda ser dividida em três categorias, de acordo com a distância câmara-objeto, representadas no Quadro 2-3 (adaptado de Gonçalves, 2005).

Quadro 2-3: Divisão da fotogrametria terrestre. Adaptado de Gonçalves (2005)

Distância câmara – objeto [m]	Tipo de fotogrametria
0,1 – 100*	Fotogrametria de curta distância
0,01 – 0,1	Macrofotogrametria
< 0,01	Microfotogrametria (as fotos são obtidas através de um microscópico)
* Alguns autores (Da Silva, Mamede, Silva & Schuler, 2012 e Kennie & Petrie, 2010) defendem que a distância máxima da fotogrametria terrestre a curta distância é de 300 m	

## 2.3 Conceitos importantes

### 2.3.1 Estereoscopia

A visão humana tem a capacidade de observar o mundo tridimensionalmente graças ao fenómeno da estereoscopia. Isto é, cada olho permite apenas ver a duas dimensões: largura e comprimento. A profundidade (terceira dimensão) é perceptível através da visão binocular. Cada olho observa o mesmo objeto de um ângulo diferente, criando dois centros de perspetiva diferentes. As diferenças entre os centros de perspetiva são interpretadas pelo cérebro como profundidade do objeto (Altrock, 2004).

Na fotogrametria, a visão estereoscópica pode ser simulada, tirando duas fotografias de pontos distintos e com sobreposição, sendo as mesmas designadas de estereopar.

### 2.3.2 Paralaxe estereoscópica

O termo paralaxe estereoscópica, ou simplesmente paralaxe, define a sensação de movimento ocorrido entre dois objetos fixos que se encontram a distâncias diferentes do ponto de observação, estando este em movimento. Um simples exemplo de observação desse fenómeno é quando nos encontramos num meio de transporte (autocarro, comboio) e observamos que os objetos mais próximos aparentam deslocar-se mais rapidamente do que os mais afastados.

Busselle (1979) afirma que quanto maior a distância entre o visor da câmara e a respetiva lente, maior o erro de paralaxe.

Uma vez que a câmara se encontra fixa na fotogrametria terrestre, a paralaxe não tem qualquer influência nesse ramo. Contudo, na fotogrametria aérea o avião encontra-se em movimento na recolha de fotografias, devendo então ter-se uma especial atenção a este fenómeno.

### 2.3.3 Marcas fiduciais e ponto principal

As marcas fiduciais são marcas de referências, podendo ser de dois tipos:

- Marcas criadas e imprimidas com o objetivo de sinalização de pontos, coladas nos objetos em estudo;
- Marcas sinalizadas na lente da câmara (Figura 2-12) com o objetivo da determinação do ponto principal que, por norma, é a projeção do centro de perspectiva no plano da imagem (Santos, 2003).

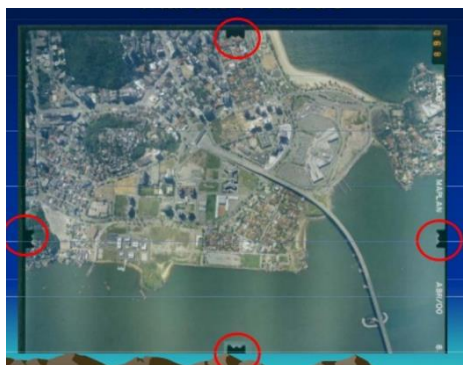


Figura 2-12: Fotografia aérea com marcas fiduciais. Extraído de Railano, 2014

Nas câmaras digitais não existem marcas fiduciais (Santos, 2003), portanto as marcas fiduciais referidas no segundo ponto são exclusivas das câmaras analógicas.

Numa câmara bem calibrada, o ponto principal é o centro geométrico da fotografia, sendo a sua localização determinada com a intersecção de linhas que unem as marcas fiduciais, designadas de linhas fiduciais (Figura 2-13).

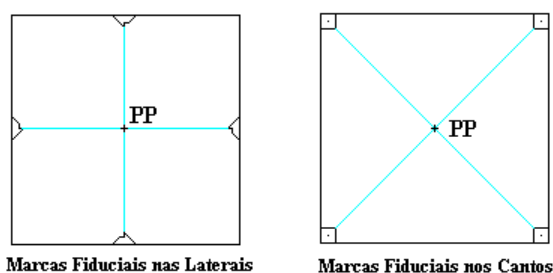


Figura 2-13: Localização das marcas fiduciais na câmara e determinação do ponto principal. Extraído de Brandalize (2004)

Quando a câmara não está calibrada ou a calibração não é bem executada, o ponto principal pode não coincidir com a intersecção das linhas fiduciais, devendo as coordenadas medidas num sistema de eixos fiduciais ser reduzidas a coordenadas relativas a um sistema cuja origem seja o ponto principal (Figura 2-14), através das seguintes expressões, para qualquer ponto imagem  $a$  (Gonçalves, 2005):

$$x'_a = x_a - x_c \quad (2-2)$$

$$y'_a = y_a - y_c \quad (2-3)$$

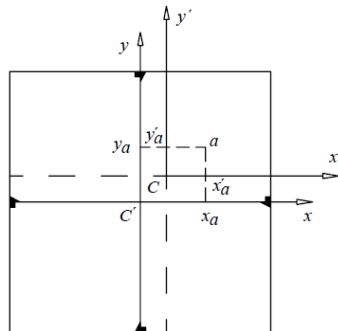


Figura 2-14: Redução das coordenadas do ponto imagem  $a$  ao ponto principal. Extraído de Gonçalves (2005, p. 57)

### 2.3.4 Orientação

Após a recolha das fotografias é necessário proceder à orientação das mesmas. Este processo divide-se em orientação interna e externa.

O objetivo da orientação interna é a referenciação da imagem relativamente à câmara (Brito & Coelho, 2007). Os Parâmetros de Orientação Interna (POI) são a distância focal, as coordenadas do ponto principal e as distorções da lente. Esses parâmetros são conhecidos através do certificado de calibração fornecido pelo fabricante ou pela calibração realizada pelo utilizador (Álvares, 2009).

Na orientação externa são relacionados os sistemas de coordenadas da fotografia com o sistema de coordenadas do objeto real, através de seis parâmetros: coordenadas  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  do centro de perspectiva e ângulos de rotação do plano da fotografia  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  (Córdoba, 2012), sendo  $\omega$  o ângulo de rotação em torno do eixo  $X$ ,  $\phi$  o ângulo de rotação em torno do eixo  $Y$  e  $\kappa$  o ângulo de rotação em torno do eixo  $Z$  (Gonçalves, 2005). Estes parâmetros são denominados Parâmetros de Orientação Externa (POE).

### 2.3.5 Retificação

Por muito que se tente tirar uma fotografia completamente perpendicular, nunca será suficiente para que a mesma se apresente sem distorções geométricas (Sampaio, 2007). Surge então a importância da retificação, que consiste num processo de transformação de uma imagem fotográfica numa imagem sem distorções geométricas, isto é, em projeção ortogonal, cuja designação é fotografia retificada ou ortofotografia (Figura 2-15).

Rezende (2009, p. 89) define fotografia retificada, ou ortofotografia, como sendo uma “imagem produzida a partir da manipulação (retificação) e correção da distorção ótica de fotografias com o objetivo de desfazer os efeitos de perspectiva”.

Com as fotografias retificadas é possível obter qualquer medida fiável necessária.

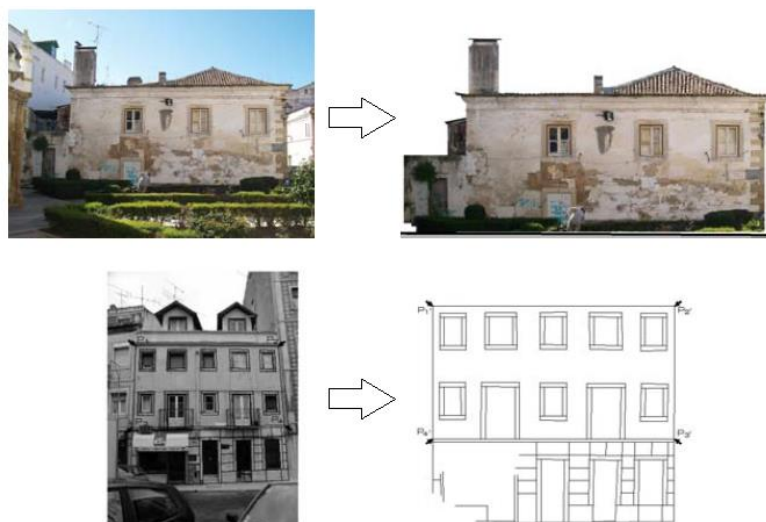


Figura 2-15: Exemplos de rectificação. Adaptado de Mateus (2010a)

### 2.3.6 Restituição

A restituição, que consiste na reconstrução fotogramétrica do objeto em estudo, pode ser de três tipos:

- Mono-restituição: é utilizada apenas uma fotografia, tomada o mais perpendicular possível ao objeto a restituir. “Uma das importantes práticas da mono-restituição é a possibilidade de restituir a imagem de uma edificação histórica já demolida através da utilização de apenas uma fotografia” (Yanaga, 2006, p. 47);
- Estéreo-restituição: utilizam-se, simultaneamente, fotografias estereopares. As fotografias são tiradas de dois pontos de vista diferentes, o mais perpendicular possível ao objeto (Figura 2-16) e procurando obter uma sobreposição longitudinal superior a 50% (Gonçalves, 2005) para se poder ter a noção da profundidade. Tipicamente, as sobreposições longitudinal e lateral são de 60% e 30%, respetivamente (Brito & Coelho, 2007);

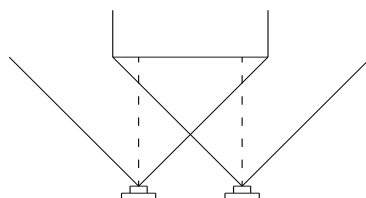


Figura 2-16: Estéreo-restituição. Adaptado de Groetelaars (2004)

- Restituição a partir de várias fotografias: neste tipo de restituição, são adquiridas várias fotografias à volta do objeto a reconstruir, podendo as mesmas ser tiradas de qualquer

ângulo (Figura 2-17), o que significa que as posições da câmara podem ser livres (Córdoba, 2012). Apenas se impõe que cada ponto homólogo apareça em, pelo menos, duas fotografias.

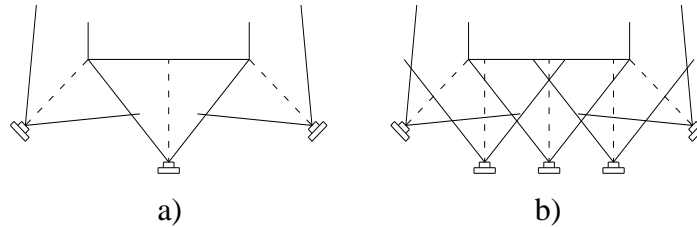


Figura 2-17: Posições aconselhadas da câmara numa restituição a partir de várias fotografias: a) para uma largura menor e b) para uma largura maior. Adaptado de Santos (2003)

## 2.4 Classificação da fotografia na fotogrametria

De acordo com Gonçalves (2005), a fotografia pode ser classificada segundo a orientação do eixo ótico da câmara, a cobertura angular e o tipo de emulsão, sendo a última uma classificação exclusiva da fotografia analógica. Neste parágrafo, é apenas abordada a classificação da fotografia segundo a orientação do eixo ótico da câmara; a classificação segundo a cobertura angular já foi referida no parágrafo 2.1.3 e a classificação segundo o tipo de emulsão não é abordada visto que no presente trabalho apenas serão utilizadas fotografias digitais.

Relativamente à classificação da fotografia segundo a orientação do eixo ótico, seja na fotogrametria terrestre ou aérea, o tipo de fotografia obtida difere consoante a posição do eixo. No caso da fotogrametria terrestre, as fotografias podem ser definidas como horizontais, quando o eixo ótico da câmara é horizontal, ou oblíquas. Gonçalves (2005) defende que as fotografias são oblíquas se o eixo ótico tiver inclinação em relação à horizontal, sendo o ângulo de elevação (positivo) quando a inclinação é para cima ou de depressão (negativo) quando a inclinação é para baixo.

No caso da fotogrametria aérea, o mesmo autor afirma que as fotografias se podem classificar em verticais, oblíquas altas, oblíquas baixas e convergentes (Figura 2-18).

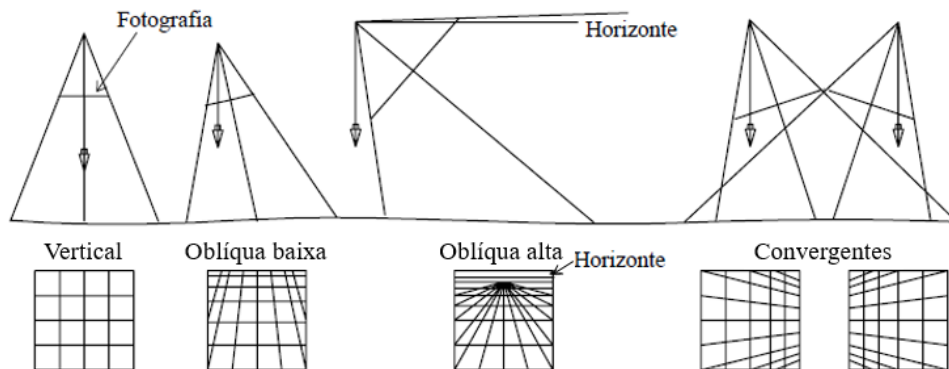


Figura 2-18: Tipos de fotografia na fotogrametria aérea. Adaptado de Gonçalves (2005)

## 2.5 Tipo de câmara utilizada na fotogrametria

As câmaras fotográficas utilizadas na fotogrametria podem ser classificadas como métricas, semi-métricas e não-métricas.

Como já foi mencionado, há câmaras que incluem marcas fiduciais, nas suas lentes. Essas câmaras são as denominadas câmaras métricas. Apesar da qualidade ótica e geométrica, são câmaras dispendiosas e de difícil manuseio (Santos, 2003).

No caso de uma câmara métrica aérea analógica (Figura 2-19), as marcas fiduciais encontram-se num plano de vidro contido na parte superior de um cone com a objetiva assente no centro do anel da base (Redweik, 2007).

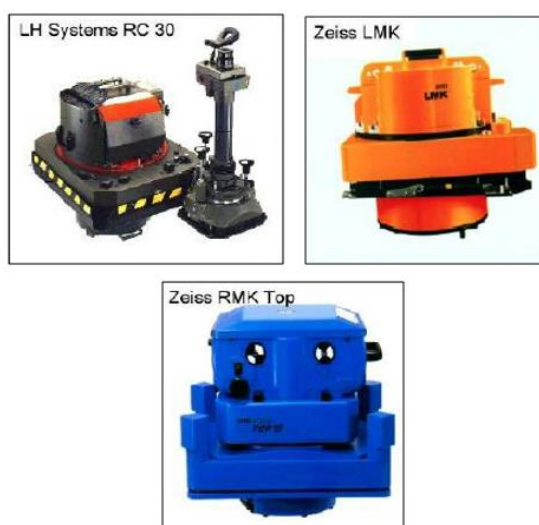


Figura 2-19: Exemplos de câmaras métricas aéreas. Adaptado de Dos Santos (2013)

Como abordado anteriormente, “as câmaras digitais não necessitam das marcas fiduciais devido à inexistência das deformações inerentes ao filme que essas mesmas marcas permitem corrigir, uma vez que a imagem digital é uma matriz de píxeis cuja geometria é rígida e bem definida” (Santos, 2003, p. 107). Uma câmara digital poderá, portanto, ser considerada métrica quando tem incluído um sistema GPS (*Global Positioning System*, sistema de posicionamento global) que determina a posição da câmara e um sistema IMU (*Inertial Measurement Unit*, unidade de medida inercial) que determina os ângulos de rotação (Redweik, 2007).

As câmaras semi-métricas, “apesar de não serem construídas com todas as características das câmaras métricas, têm a possibilidade de aplicar correções associadas ao uso de *réseau* (grelha com marcas de referência calibradas)” (Santos, 2003, p.39).

As câmaras não-métricas são as câmaras comuns. Neste tipo de câmaras, é fundamental a qualidade de imagem ao invés da qualidade geométrica (Santos, 2003). São significativamente mais económicas do que as câmaras métricas e são de fácil manuseio, porém, para que tenham um bom funcionamento para o propósito da fotogrametria, devem ser cuidadosamente calibradas.

## **2.6 Observações finais**

Pode-se considerar que a fotografia evoluiu de um modo exponencial, tendo em conta o seu percurso pouco evolutivo desde a câmara escura até ao primeiro método de registo permanente de imagem (heliografia) e o seu rápido desenvolvimento a partir do século XIX até à atualidade. Quanto à fotogrametria, esta pode ser considerada, simultaneamente, uma técnica antiga e recente: nasceu logo após a descoberta da fotografia, no século XIX, porém só no final dos anos 80 é que houve uma evolução significativa, e apenas no século XXI é que começou a ganhar mais importância e a ter mais facilidade de utilização. E se nos tempos em que surgiu era uma técnica bastante dispendiosa e de grande complexidade, hoje apresenta maior acessibilidade, tanto a nível financeiro como de utilização.

## 3. Fundamentos da fotogrametria

Neste capítulo são descritos os objetivos e as tarefas executadas nas fases de trabalho da fotogrametria.

São introduzidas as condições de colinearidade e de coplanaridade e dadas breves noções da condição de coangularidade, cujas equações podem ser aplicadas no cálculo da orientação externa, referida no capítulo anterior. Para uma melhor compreensão destas condições, é previamente abordado o conceito de matriz de rotação, aprofundando os conhecimentos dos ângulos de rotação do plano da fotografia  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ , também denominados de ângulos de Euler (Brito & Coelho, 2007; Silva, 2014).

### 3.1 Introdução

Os trabalhos fotogramétricos são divididos em duas fases: fase de campo e fase de gabinete. Na fase de campo são tiradas as fotografias do objeto em causa e, opcionalmente, registadas as coordenadas do centro de perspectiva (posição da câmara) e dos pontos de controlo, que podem ser naturais ou artificiais (Santos, 2003), sendo considerados pontos artificiais os pontos obtidos através de marcas fiduciais coladas nos lugares pretendidos. Os pontos naturais são simplesmente pontos do edifício onde não foi colada qualquer marca, muitas vezes por se encontrarem a uma altura elevada e/ou por serem de difícil acesso.

Nesta fase é necessário uma câmara fotográfica e, eventualmente, um instrumento de medida, por exemplo uma fita métrica. Para o caso de se pretender registar as coordenadas, poderá ser utilizado um equipamento específico de registo de coordenadas no espaço-objeto (terreno), optando-se pelo teodolito ou pela estação total.

A fase de gabinete engloba a orientação de fotografias e posterior retificação e restituição, podendo-se recorrer a aplicações informáticas. Como programa informático de desenho é,

geralmente, utilizado o *AutoCAD*. Relativamente a programas específicos de fotogrametria, estão disponíveis programas como o *E-foto*, *PhotoModeler* e *ImageStation*. Podem, ainda, ser utilizados programas de tratamento de imagem, como o *GIMP* ou o *PhotoShop*, podendo estes ser também um auxílio na determinação das coordenadas no espaço-imagem (fotografia).

## 3.2 Fases de trabalho e metodologia

### 3.2.1 Fase de campo

É importante haver um planeamento prévio de como se devem tirar as fotografias. Relembre-se que os pontos homólogos são pontos coincidentes em duas fotografias, devendo cada fotografia abranger todas as áreas do objeto que se pretende estudar, pelo menos, duas vezes para a marcação dos pontos homólogos. A distância a que as fotografias são tiradas também importa, pois quanto menor a distância da câmara ao objeto, maior a escala, isto é, o número de píxeis por centímetro é maior, diminuindo os erros posteriores verificados na picagem dos pontos. Antes da recolha de fotografias podem ser coladas marcas fiduciais para um maior rigor na picagem de pontos.

No momento de serem tiradas as fotografias, deve ser avaliada se a iluminação é favorável para a visibilidade dos pontos (Figura 3-1).



Figura 3-1 Exemplo de fotografias com visualização de pontos condicionada por: a) sol e b) sombras.

Opcionalmente, podem ser registados os dados para as coordenadas dos pontos de controlo. Se se utilizar um programa informático, essas coordenadas podem ser inseridas no projeto para escalar o objeto ou situar o plano fotografado. Também são úteis na resolução dos cálculos da orientação externa, devendo também ser registadas as posições da câmara em cada fotografia tirada, para o cálculo dos centros de perspectiva.

Durante a fase de campo podem também ser tiradas algumas medidas de referência. Essas medidas podem ser úteis para comparação com os resultados obtidos posteriormente ou para serem usadas como escala.

#### **3.2.2 Fase de gabinete**

Para a fase de gabinete do presente trabalho foi utilizado um programa específico para a retificação e restituição de fotografias. Contudo, é possível realizar tal tarefa com programas que não sejam voltados para a fotogrametria. No Apêndice A encontra-se um exemplo de retificação de imagem, onde se retificou uma fotografia de fachada utilizando apenas programas de desenho e de tratamento de imagem.

Antes da picagem dos pontos, as fotografias podem ser trabalhadas em programas de tratamento de imagem, por exemplo, para aumentar o contraste e permitir uma melhor visualização das fronteiras das zonas das fotografias.

O processo da picagem de pontos homólogos serve para referenciar as fotografias entre si e pode ser realizado de dois modos: picando os pontos das fotografias uma a uma e no final fazer a correspondência dos pontos homólogos ou trabalhar as fotografias em simultâneo (geralmente duas a duas) e realizar a correspondência dos pontos logo na sua picagem.

Se se optar pela adição de pontos de controlo, podem ser considerados como suas coordenadas os valores dos dados obtidos na fase anterior. No entanto, a escolha de um sistema com eixos coincidentes às arestas ou limites do objeto em estudo pode facilitar nos cálculos da orientação externa, transformando também as coordenadas dos centros de perspectiva a partir dos dados obtidos.

Quando se utiliza um programa de fotogrametria, no final da restituição do modelo, pode ser utilizado um programa de desenho para ser executada a revisão do mesmo.

### **3.3 Matriz de rotação**

Cada rotação de eixo resulta numa sub-matriz de rotação. A matriz de rotação final resulta da multiplicação das três sub-matrizes, dependendo da ordem a que a multiplicação é feita.

A rotação dos eixos segue a regra da mão-direita, ou seja, o sentido positivo dá-se no sentido anti-horário, como exemplificado da Figura 3-2 à Figura 3-4.

- Rotação em torno do eixo  $X$  (onde  $X_\omega$ ,  $Y_\omega$  e  $Z_\omega$  corresponde aos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  rodados segundo o ângulo  $\omega$ ):

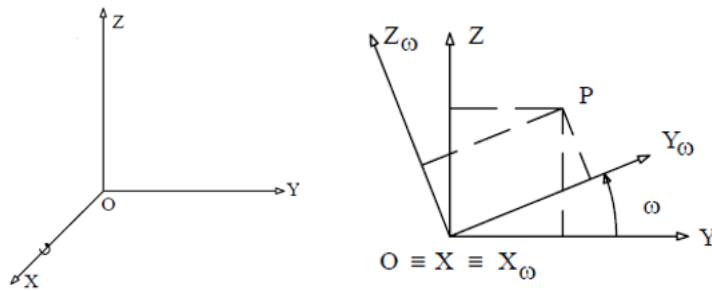


Figura 3-2: Rotação  $\omega$ , em torno do eixo X. Adaptado de Gonçalves (2005)

De acordo com Gonçalves (2005), a rotação em torno do eixo X expressa-se pelas seguintes fórmulas:

$$\begin{cases} X_\omega = X \\ Y_\omega = \cos\omega Y + \text{sen}\omega Z \\ Z_\omega = -\text{sen}\omega Y + \cos\omega Z \end{cases} \quad (3-1)$$

Resultando na matriz (3-2), consoante o mesmo autor.

$$M_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \text{sen}\omega \\ 0 & -\text{sen}\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

- Rotação em torno do eixo Y (onde  $X_\phi$ ,  $Y_\phi$  e  $Z_\phi$  corresponde aos eixos X, Y e Z rodados segundo o ângulo  $\phi$ ):

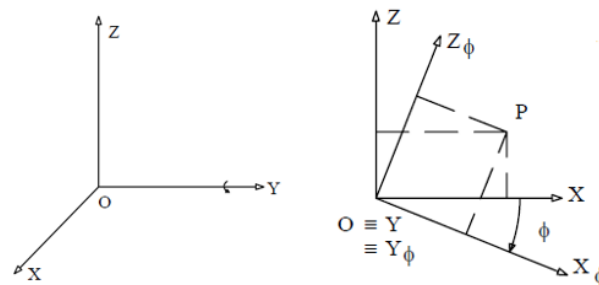


Figura 3-3: Rotação  $\phi$ , em torno do eixo Y. Adaptado de Gonçalves (2005)

Gonçalves (2005) apresenta, analogamente, as seguintes expressões e matriz para a rotação em Y:

$$\begin{cases} X_\phi = \cos\phi X - \text{sen}\phi Z \\ Y_\phi = Y \\ Z_\phi = \text{sen}\phi X + \cos\phi Z \end{cases} \quad (3-3)$$

$$M_{\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\text{sen}\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

- Rotação em torno do eixo Z (onde  $X_{\kappa}$ ,  $Y_{\kappa}$  e  $Z_{\kappa}$  corresponde aos eixos X, Y e Z rodados segundo o ângulo  $\kappa$ ):

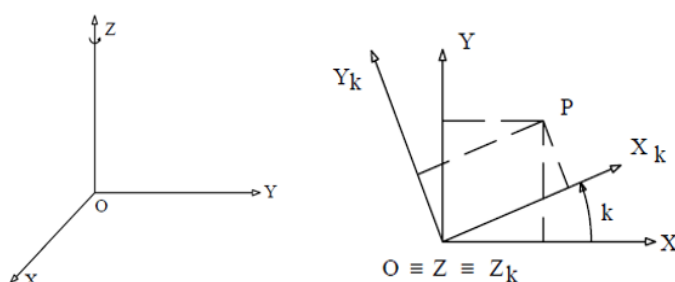


Figura 3-4: Rotação  $\kappa$ , em torno do eixo Z. Adaptado de Gonçalves (2005)

Finalmente, para a rotação em torno de Z tem-se:

$$\begin{cases} X_{\kappa} = \cos\kappa X + \text{sen}\kappa Y \\ Y_{\kappa} = -\text{sen}\kappa X + \cos\kappa Y \\ Z_{\kappa} = Z \end{cases} \quad (3-5)$$

$$M_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \text{sen}\kappa & 0 \\ -\text{sen}\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

Para a sequência de rotações  $\kappa$ - $\phi$ - $\omega$  tem-se a matriz de rotação final  $M_{\kappa\phi\omega}$ .

$$\begin{aligned} M_{\kappa\phi\omega} &= M_{\kappa} \times M_{\phi} \times M_{\omega} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\kappa & \cos\omega \text{sen}\kappa + \text{sen}\omega \text{sen}\phi \cos\kappa & \text{sen}\omega \text{sen}\kappa - \cos\omega \text{sen}\phi \cos\kappa \\ -\cos\phi \text{sen}\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \text{sen}\omega \text{sen}\phi \text{sen}\kappa & \text{sen}\omega \cos\kappa + \cos\omega \text{sen}\phi \text{sen}\kappa \\ \text{sen}\phi & -\text{sen}\omega \cos\phi & \cos\omega \cos\phi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-7)$$

Que pode ser representada de forma simplificada como (Gonçalves, 2005):

$$M_{\kappa\phi\omega} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

Note-se que a ordem de multiplicação das matrizes influencia a matriz final, devendo, portanto, ficar bem definida a sequência de realização das rotações. Em Silva (2014) encontram-se os resultados das restantes ordens de multiplicação, nas páginas 128 a 130. São também apresentadas as definições de rotação ativa e passiva sendo esses conceitos decisivos na

convenção da matriz de rotação, trocando os sinais dos senos ou trocando os sinais de rotação, quando se muda de um sistema para outro. “O resultado da rotação de sentido positivo num sistema é o mesmo com sinal negativo no outro” (Silva, 2014, p. 39). Como observado na Figura 3-5, na rotação ativa o que muda é o objeto, enquanto na rotação passiva o objeto fica estático, variando o sistema (Lugnani, 1987, citado em Silva, 2014).

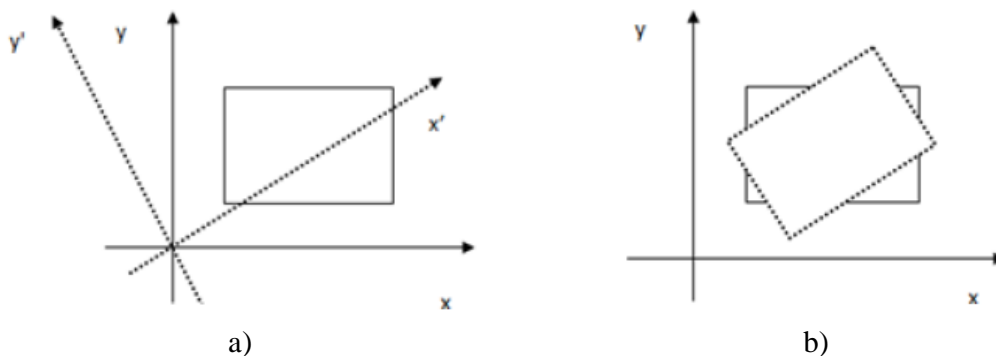


Figura 3-5: a) Rotação passiva e b) rotação ativa. Extraído de Silva (2014, p. 39)

Conclui-se que a matriz (3-7) é uma matriz de rotação passiva. A matriz de rotação ativa seria:

$$M_{\kappa\phi\omega} = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\kappa & \sin\omega \sin\phi \cos\kappa - \cos\omega \sin\kappa & \cos\omega \sin\phi \cos\kappa + \sin\omega \sin\kappa \\ \cos\phi \sin\kappa & \cos\omega \cos\kappa + \sin\omega \sin\phi \sin\kappa & \cos\omega \sin\phi \sin\kappa - \sin\omega \cos\kappa \\ -\sin\phi & \sin\omega \cos\phi & \cos\omega \cos\phi \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

### 3.4 Colinearidade

Em fotogrametria define-se colinearidade quando um ponto no espaço-objeto,  $P$ , o seu correspondente no espaço-imagem,  $p$ , e o centro de perspectiva,  $C$ , se encontram alinhados na mesma linha reta (Gonçalves, 2005), como demonstrado na Figura 3-6.

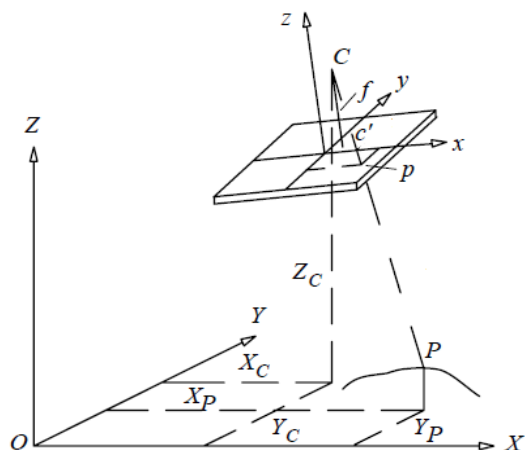


Figura 3-6: Condição de colinearidade. Adaptado de Gonçalves (2005)

Sendo o ponto  $P$  o ponto do espaço-objeto, de coordenadas  $X_P, Y_P$  e  $Z_P$  e o ponto  $p$  o seu correspondente no espaço-imagem de coordenadas  $x_p, y_p$  e  $z_p$ , realiza-se uma rotação “imaginária” do plano fotográfico de modo a que o ponto  $p$  apresente coordenadas  $x'_p, y'_p$  e  $z'_p$  no sistema  $x', y', z'$  paralelo ao sistema  $X, Y, Z$ , como explicado na Figura 3-7 (Pereira, 2005), sendo  $X_C, Y_C$  e  $Z_C$  as coordenadas do centro de perspectiva e  $x_c, y_c$  e  $z_c$  as coordenadas do ponto principal.

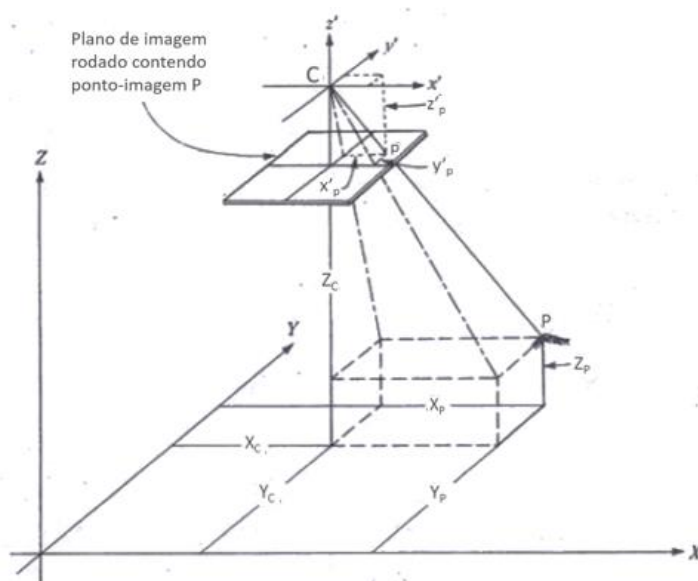


Figura 3-7: Paralelismo entre o sistema de coordenadas no espaço-imagem e o sistema de coordenadas no espaço-objeto. Adaptado de Wolf (1983) citado em Pereira (2005)

Nas equações (3-10), as coordenadas do ponto  $p$  são calculadas com base nos elementos da matriz de rotação (3-7) e nas coordenadas do sistema de eixos  $x', y', z'$  (Pereira, 2005) com  $z_p - z_c = -f$ , sendo  $f$  o valor da distância focal (Derenyi, 1996):

$$\begin{cases} x_p - x_c = m_{11}x'_p + m_{12}y'_p + m_{13}z'_p \\ y_p - y_c = m_{21}x'_p + m_{22}y'_p + m_{23}z'_p \\ -f = m_{31}x'_p + m_{32}y'_p + m_{33}z'_p \end{cases} \quad (3-10)$$

É obtida, através da relação de semelhança de triângulos, a seguinte expressão (Pereira, 2005):

$$\frac{x'_p}{X_P - X_C} = \frac{y'_p}{Y_P - Y_C} = \frac{z'_p}{Z_P - Z_C} \quad (3-11)$$

Reduzindo:

$$\begin{cases} x'_p = z'_p \frac{X_P - X_C}{Z_P - Z_C} \\ y'_p = z'_p \frac{Y_P - Y_C}{Z_P - Z_C} \\ z'_p = z'_p \frac{Z_P - Z_C}{Z_P - Z_C} \end{cases} \quad (3-12)$$

Substituindo (3-12) nas equações (3-10), vem (Pereira, 2005):

$$\begin{cases} x_p - x_c = m_{11}z'_p \frac{X_P - X_C}{Z_P - Z_C} + m_{12}z'_p \frac{Y_P - Y_C}{Z_P - Z_C} + m_{13}z'_p \frac{Z_P - Z_C}{Z_P - Z_C} \\ y_p - y_c = m_{21}z'_p \frac{X_P - X_C}{Z_P - Z_C} + m_{22}z'_p \frac{Y_P - Y_C}{Z_P - Z_C} + m_{23}z'_p \frac{Z_P - Z_C}{Z_P - Z_C} \\ -f = m_{31}z'_p \frac{X_P - X_C}{Z_P - Z_C} + m_{32}z'_p \frac{Y_P - Y_C}{Z_P - Z_C} + m_{33}z'_p \frac{Z_P - Z_C}{Z_P - Z_C} \end{cases} \quad (3-13)$$

Colocando o termo  $\frac{z'_p}{Z_P - Z_C}$  em evidência e dividindo as duas primeiras equações pela terceira, obtêm-se as equações de colinearidade (Derenyi, 1996; Pereira, 2005):

$$\begin{cases} x_p - x_c = -f \frac{m_{11}(X_P - X_C) + m_{12}(Y_P - Y_C) + m_{13}(Z_P - Z_C)}{m_{31}(X_P - X_C) + m_{32}(Y_P - Y_C) + m_{33}(Z_P - Z_C)} \\ y_p - y_c = -f \frac{m_{21}(X_P - X_C) + m_{22}(Y_P - Y_C) + m_{23}(Z_P - Z_C)}{m_{31}(X_P - X_C) + m_{32}(Y_P - Y_C) + m_{33}(Z_P - Z_C)} \end{cases} \quad (3-14)$$

Encontram-se outros modos de dedução das equações de colinearidade, consideradas as equações mais importantes da fotogrametria (Pereira, 2005), em, por exemplo:

- Santos, 2003, pp. 177-180;
- Gonçalves, 2005, pp. 39 e 40;
- Brito e Coelho, 2007, pp. 111-114.

Alguns autores (Brito & Coelho, 2007; Gonçalves, 2005) fazem a distinção entre resseção espacial e intersecção espacial, onde são aplicadas as equações de colinearidade.

### 3.4.1 Resseção espacial

A resseção espacial consiste na determinação dos POE aplicando as equações de colinearidade com, no mínimo, três pontos de controlo não colineares (Brito & Coelho, 2007; Gonçalves, 2005; Silva, 2014).

Admite-se que a distância focal ( $f$ ) e as coordenadas do ponto principal ( $x_c$  e  $y_c$ ) são conhecidas do certificado de calibração fornecido pelo fabricante. Então, para os pontos de controlo do espaço-objeto  $I (X_I, Y_I, Z_I)$ ,  $II (X_{II}, Y_{II}, Z_{II})$  e  $III (X_{III}, Y_{III}, Z_{III})$  e seus correspondentes no espaço-imagem  $i (x_i, y_i)$ ,  $ii (x_{ii}, y_{ii})$  e  $iii (x_{iii}, y_{iii})$ , tem-se as seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i = x_c - f \frac{m_{11}(X_I - X_C) + m_{12}(Y_I - Y_C) + m_{13}(Z_I - Z_C)}{m_{31}(X_I - X_C) + m_{32}(Y_I - Y_C) + m_{33}(Z_I - Z_C)} \\ y_i = y_c - f \frac{m_{21}(X_I - X_C) + m_{22}(Y_I - Y_C) + m_{23}(Z_I - Z_C)}{m_{31}(X_I - X_C) + m_{32}(Y_I - Y_C) + m_{33}(Z_I - Z_C)} \\ x_{ii} = x_c - f \frac{m_{11}(X_{II} - X_C) + m_{12}(Y_{II} - Y_C) + m_{13}(Z_{II} - Z_C)}{m_{31}(X_{II} - X_C) + m_{32}(Y_{II} - Y_C) + m_{33}(Z_{II} - Z_C)} \\ y_{ii} = y_c - f \frac{m_{21}(X_{II} - X_C) + m_{22}(Y_{II} - Y_C) + m_{23}(Z_{II} - Z_C)}{m_{31}(X_{II} - X_C) + m_{32}(Y_{II} - Y_C) + m_{33}(Z_{II} - Z_C)} \\ x_{iii} = x_c - f \frac{m_{11}(X_{III} - X_C) + m_{12}(Y_{III} - Y_C) + m_{13}(Z_{III} - Z_C)}{m_{31}(X_{III} - X_C) + m_{32}(Y_{III} - Y_C) + m_{33}(Z_{III} - Z_C)} \\ y_{iii} = y_c - f \frac{m_{21}(X_{III} - X_C) + m_{22}(Y_{III} - Y_C) + m_{23}(Z_{III} - Z_C)}{m_{31}(X_{III} - X_C) + m_{32}(Y_{III} - Y_C) + m_{33}(Z_{III} - Z_C)} \end{array} \right. \quad (3-15)$$

O modelo composto pelas equações (3-15) não é linear, sendo necessário aproximações iniciais para as incógnitas, de modo a que seja possível aplicar um processo iterativo à resolução das equações (Brito & Coelho, 2007).

Gonçalves (2005) sugere, para a fotogrametria aérea, as seguintes aproximações:

- $Z_C$  é obtido no altímetro;
- $X_C$  e  $Y_C$  são calculados através da média das coordenadas  $X$  e  $Y$  dos pontos de controlo;
- $\omega_0$  e  $\phi_0$  são considerados nulos;
- $\kappa$  é o ângulo entre o eixo  $X$  do espaço-objeto e o eixo  $x$  do espaço-imagem.

Para a fotogrametria terrestre, os eixos do plano da fotografia são os eixos  $X$  e  $Z$ , enquanto o eixo  $Y$  representa profundidade. Para a adaptação da câmara de aérea para terrestre, e considerando a sequência de rotações  $\kappa$ - $\phi$ - $\omega$ , é feita uma rotação  $\omega$  de  $90^\circ$ . Assim, as aproximações iniciais na fotogrametria terrestre são:

- $X_C$  é a distância a que a câmara se encontra da origem do sistema de eixos, medida paralelamente ao objeto fotografado;
- $Y_C$  é a distância da câmara ao objeto fotografado;

- $Z_C$  é a altura a que a câmara se encontra do solo;
- $\omega_0$  é considerado  $90^\circ$ ;
- $\phi_0$  é considerado nulo;
- $\kappa_0$  é assumido nulo se a fotografia for em modo paisagem ou  $\pm 90^\circ$  se for em modo retrato (positivo se a orientação da câmara estiver para a direita e negativo se estiver para a esquerda).

No Capítulo 5 são mostrados exemplos que provaram a validade dessas aproximações iniciais.

### 3.4.2 Intersecção espacial

O conhecimento dos POE de duas fotografias estereopares possibilita o cálculo das coordenadas no espaço-objeto de qualquer ponto cujas coordenadas do espaço-imagem sejam conhecidas (Brito & Coelho, 2007; Gonçalves, 2005).

Sendo as equações (3-10) expressas como  $X = MX'$  e sabendo que  $M$  é uma matriz ortogonal, vem  $M^T M = I$ , então  $M^T X = M^T M X' \Leftrightarrow M^T X = X'$  (Pereira, 2005). Relembrando que  $x_p$  e  $y_p$  são as coordenadas de um ponto no espaço-imagem e que  $x_c$  e  $y_c$  são as coordenadas do ponto principal, as equações (3-10) podem ser reescritas como:

$$\begin{cases} x'_p = m_{11}(x_p - x_c) + m_{21}(y_p - y_c) - m_{31}f \\ y'_p = m_{12}(x_p - x_c) + m_{22}(y_p - y_c) - m_{32}f \\ z'_p = m_{13}(x_p - x_c) + m_{23}(y_p - y_c) - m_{33}f \end{cases} \quad (3-16)$$

Tendo  $X_P$ ,  $Y_P$  e  $Z_P$  como coordenadas de um ponto no espaço-objeto e  $X_C$ ,  $Y_C$  e  $Z_C$  como coordenadas do centro de perspectiva, multiplicam-se as equações (3-16) por um factor de escala  $s$  e realiza-se uma translação entre sistemas de coordenadas, obtendo (Pereira, 2005):

$$\begin{cases} X_P = sx'_p + X_C = s(m_{11}(x_p - x_c) + m_{21}(y_p - y_c) - m_{31}f) + X_C \\ Y_P = sy'_p + Y_C = s(m_{12}(x_p - x_c) + m_{22}(y_p - y_c) - m_{32}f) + Y_C \\ Z_P = sz'_p + Z_C = s(m_{13}(x_p - x_c) + m_{23}(y_p - y_c) - m_{33}f) + Z_C \end{cases} \quad (3-17)$$

Isolando o factor de escala  $s$  na última equação, vem:

$$s = \frac{Z_P - Z_C}{m_{13}(x_p - x_c) + m_{23}(y_p - y_c) - m_{33}f} \quad (3-18)$$

Substituindo o factor de escala  $s$  das duas primeiras equações (3-17) resulta (Pereira, 2005):

$$\begin{cases} X_P = X_C + (Z_P - Z_C) \frac{m_{11}(x_p - x_c) + m_{21}(y_p - y_c) - m_{31}f}{m_{13}(x_p - x_c) + m_{23}(y_p - y_c) - m_{33}f} \\ Y_P = Y_C + (Z_P - Z_C) \frac{m_{12}(x_p - x_c) + m_{22}(y_p - y_c) - m_{32}f}{m_{13}(x_p - x_c) + m_{23}(y_p - y_c) - m_{33}f} \end{cases} \quad (3-19)$$

Pelas equações (3-19) observa-se que as coordenadas  $X_P$  e  $Y_P$  dos pontos do espaço-objeto dependem da coordenada  $Z_P$ . Sendo a coordenada  $Z_P$  indeterminada, a cada ponto do espaço-imagem corresponde um número infinito de pontos do espaço-objeto (Pereira, 2005). Por essa razão é utilizado um estereopar, pois desse modo o ponto, cujas coordenadas se pretendem determinar, encontra-se presente em duas fotografias diferentes o que permite, segundo Pereira (2005), a formulação de quatro equações de intersecção espacial tendo três incógnitas ( $X_P$ ,  $Y_P$  e  $Z_P$ ), assumindo que são conhecidos os restantes parâmetros.

### 3.5 Coplanaridade

A condição de coplanaridade define que os dois centros de perspectiva,  $C_1$  e  $C_2$ , de duas fotografias com sobreposição, um qualquer ponto no espaço-objeto,  $P$ , e os seus pontos correspondentes no espaço-imagem nas duas fotografias referidas,  $p_1$  e  $p_2$ , encontram-se no mesmo plano (Gonçalves, 2005). Para duas fotos, os dois raios conjugados definidos para cada ponto objeto devem ser coplanares (Grussenmeyer & Khalil, 2002).

Sendo  $\vec{R}_1$  e  $\vec{R}_2$  os vectores que definem a localização do ponto  $P$  e  $B_X$ ,  $B_Y$  e  $B_Z$  as componentes do vector base  $\vec{B}$ , a condição de coplanaridade é representada através da Figura 3-8.

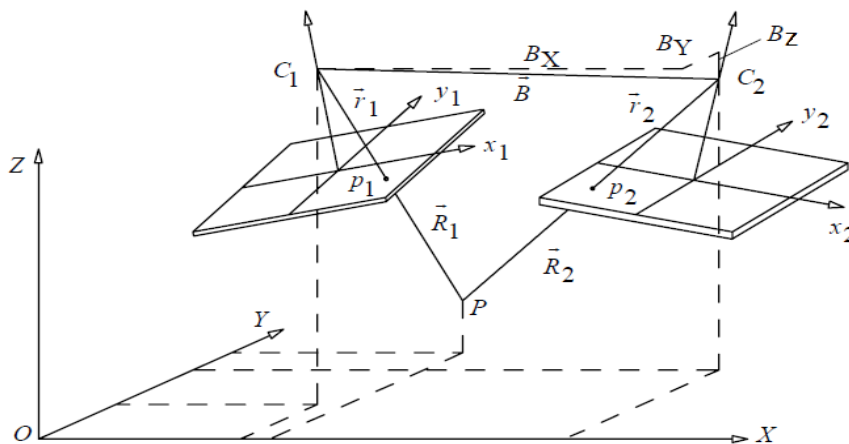


Figura 3-8: Condição de coplanaridade. Extraído de Gonçalves (2005)

Segundo Gonçalves (2005), a condição de coplanaridade pode ser escrita, vectorialmente, por:

$$F_i = \vec{B} \cdot \vec{R}_1 \times \vec{R}_2 = 0 \quad (3-20)$$

Ou, matricialmente:

$$\begin{vmatrix} B_X & B_Y & B_Z \\ X_{R_1} & Y_{R_1} & Z_{R_1} \\ X_{R_2} & Y_{R_2} & Z_{R_2} \end{vmatrix} = 0 \quad (3-21)$$

Podendo, ainda, ser escrita como:

$$B_X(Y_{R_1}Z_{R_2} - Y_{R_2}Z_{R_1}) - B_Y(X_{R_1}Z_{R_2} - X_{R_2}Z_{R_1}) + B_Z(X_{R_1}Y_{R_2} - X_{R_2}Y_{R_1}) = 0 \quad (3-22)$$

Sendo os vectores  $\vec{R}_1$  e  $\vec{R}_2$  expressos por:

$$\vec{R}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \end{bmatrix} \text{ e } \vec{R}_2 = \begin{bmatrix} m_{11}x_2 + m_{21}y_2 - m_{31}f \\ m_{12}x_2 + m_{22}y_2 - m_{32}f \\ m_{13}x_2 + m_{23}y_2 - m_{33}f \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

Substituindo os elementos da equação (3-23) na equação (3-20) obtém-se a seguinte equação:

$$F = (B_X y_1 - B_Y x_1)(m_{13}x_2 + m_{23}y_2 - m_{33}f) + (B_Z x_1 + B_X f) \\ (m_{12}x_2 + m_{22}y_2 - m_{32}f) - (B_Y f + B_Z y_1)(m_{11}x_2 + m_{21}y_2 - m_{31}f) \quad (3-24)$$

De acordo com Gonçalves (2005), a condição de coplanaridade, por serem utilizados os POE e os POI de duas fotografias em simultâneo, acaba por ser mais complexa do que a condição de colinearidade. No entanto, a coplanaridade tem como vantagens o facto de dispensar o emprego das coordenadas dos pontos no espaço-objeto e a redução do número de equações para o mesmo número de pontos.

### 3.6 Coangularidade

Ao contrário da colinearidade e da coplanaridade, o conceito de coangularidade não é tão divulgado.

A condição de coangularidade diz que o ângulo  $a\hat{O}b$  entre os raios  $u_a$  e  $u_b$  do espaço-imagem é igual ao seu ângulo correspondente do espaço-objeto  $A\hat{O}B$  entre os raios  $U_A$  e  $U_B$  (Wang, 1992), observado na Figura 3-9.

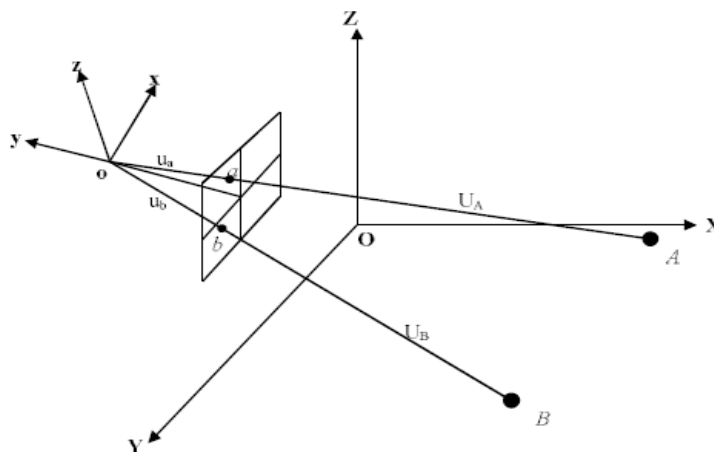


Figura 3-9: Condição de coangularidade. Extraído de Grussenmeyer e Khalil (2002)

O modelo da condição pode ser expresso pela função  $F$ , apresentada na equação (3-25) (Wang, 1992; Grussenmeyer & Khalil, 2002).

$$F(U, u) = \phi_{AB} - \phi_{ab} = 0 \tag{3-25}$$

Sendo  $\phi_{AB}$  o ângulo entre o centro de perspectiva e os pontos  $A$  e  $B$  do espaço-objeto e  $\phi_{ab}$  o ângulo entre o centro de perspectiva e os pontos  $a$  e  $b$  do espaço-imagem (Grussenmeyer & Khalil, 2002).



## 4. Equipamentos utilizados no desenvolvimento do trabalho

Os equipamentos utilizados, nas fases de campo e de gabinete nos levantamentos apresentados nos Capítulos 5 e 6 são descritos neste capítulo. É também feita uma introdução ao programa de fotogrametria *PhotoModeler*, nomeadamente, ao seu funcionamento e aos erros de projeto tendo como fonte o Manual do *PhotoModeler* (2015). É também explicada a componente de calibração do programa, quais os diferentes métodos de calibração e os cuidados a ter na realização desta operação.

As várias maneiras utilizadas na calibração da câmara fotográfica são descritas no final do capítulo, bem como os seus resultados.

### 4.1 Equipamentos em fase de campo

A câmara fotográfica utilizada na recolha de fotografias foi a câmara digital *Canon PowerShot SX30 IS* com resolução de 4320×3240 píxeis e com uma distância focal de 4,3 mm, propriedade do Departamento de Engenharia Civil da ESTGV. O seu sensor é do tipo CCD com 6,17 mm de largura e 4,55 mm de altura.

Para a recolha e registo dos dados das coordenadas de pontos predefinidos e do centro de perspectiva em cada fotografia, utilizou-se a estação total *GeoMax Zoom 30*. Os dados para o cálculo das coordenadas podem ser obtidos através de um prisma refletor ou de um laser emitido pela estação total, tendo sido apenas utilizada a última opção durante a realização do trabalho.

## 4.2 Equipamentos em fase de gabinete (aplicações/programas informáticos)

Nesta etapa, foi utilizado o *AutoCAD* versão de 2015 como programa de desenho, em especial para a revisão dos modelos. Para tratamento de imagem e auxílio da determinação das coordenadas de pontos no espaço-imagem optou-se pelo código informático *GIMP*.

Para a restituição dos modelos, utilizou-se o *PhotoModeler* versão de 2011.

### 4.2.1 *PhotoModeler*

O *PhotoModeler* é um programa de fotogrametria, produzido e distribuído pela empresa *Eos Systems*, que permite, entre outras possibilidades, extrair medidas e modelos 3D a partir de fotografias.

Podem ser utilizadas câmaras métricas ou não-métricas, podendo as últimas ser calibradas ou não. Para a calibração, o *PhotoModeler* incluiu uma componente para o efeito. Quando a câmara não é calibrada, é designada de “câmara desconhecida” pelo programa, sendo os seus parâmetros resolvidos por um dos seguintes métodos: pontos de controlo (através de cinco pontos de controlo), formas (predefinindo formas, como pirâmides, caixas) ou restrições (definindo, pelo menos, três linhas paralelas e perpendiculares, na perspetiva).

O *PhotoModeler* disponibiliza marcas fiduciais, conhecidas pelo programa como *Automated Coded Targets* (alvos codificados automatizados, Figura 4-1). Esses alvos codificados, que consistem num ponto de alto contraste rodeado por um padrão colocados no objeto a fotografar, são automaticamente reconhecidos pelo programa, podendo ser de dois tipos: *Ringed Automatically Detected Target* (RAD, alvos anelados automaticamente detetados), que são também utilizados na calibração, ou *Non-Ringed Coded Targets* (alvos codificados não anelados). Geralmente, os RAD oferecem melhores resultados (Manual do *PhotoModeler*, 2015).



Figura 4-1: Alvos codificados: a) RAD e b) alvo codificado não anelado

Na realização de um projeto, após a picagem dos pontos e conclusão do traçado de linhas, é feito um processamento durante o qual o programa faz a orientação das fotografias. No final, o *PhotoModeler* apresenta uma mensagem de processamento com os valores do erro total e do resíduo máximo obtidos, abordados no parágrafo 4.2.1.1.

Quando as fotografias estão orientadas, é possível continuar com a picagem de pontos. Nessa situação, ao ser picado um novo ponto numa fotografia, o programa calcula a sua possível

localização noutra fotografia onde se queira referenciá-lo, por meio de linhas, apresentando um resíduo potencial. Na Figura 4-2 encontra-se um exemplo desta situação.

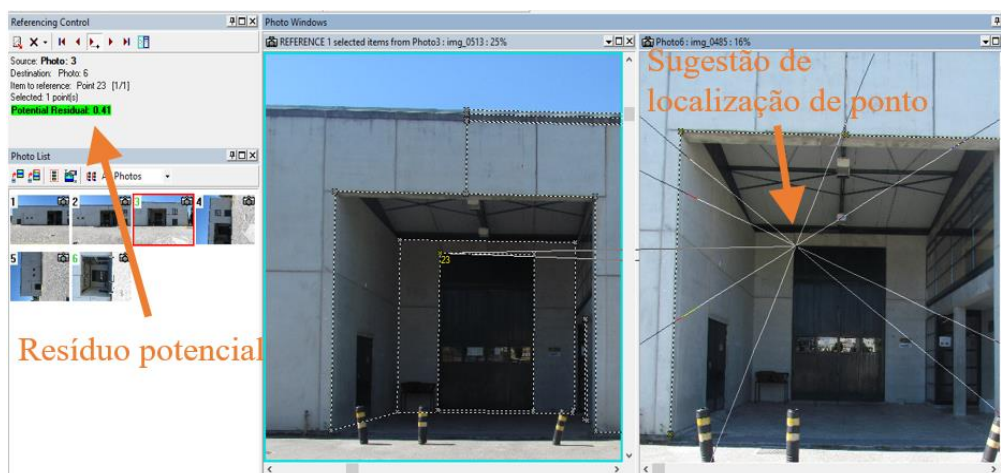


Figura 4-2: Sugestão de localização de um novo ponto na sua referência

Com um projeto processado pode ser consultado, a qualquer momento, o seu relatório na opção *Show Report* (mostrar relatório). O relatório do projeto apresenta os problemas existentes do projeto e sugestões das suas resoluções. No caso de um projeto de calibração, por exemplo, podem ser consultados os valores dos POI e do tamanho do sensor da câmara.

O *PhotoModeler* tem a opção de criar modelos com texturas, geradas a partir das fotografias usadas no projeto. Para o efeito, devem ser criadas superfícies com a ferramenta *Surface Tools* (ferramentas de superfícies) disponível no programa. São disponibilizadas várias opções de desenho, podendo optar-se, por exemplo, por superfícies planas ou curvas, triangulares ou sem forma definida. Com as superfícies desenhadas, o *PhotoModeler* atribui automaticamente as fotografias às superfícies criadas.

No final, pode ser observado o modelo 3D no programa na opção pretendida (estrutura de arame, texturizado). Pode ainda ser exportado o modelo para um ficheiro *DXF*, sendo esta opção útil para uma revisão em *AutoCAD*.

### 4.2.1.1 Erros de projeto

A qualidade do projeto é analisada através da observação dos erros obtidos. O erro residual (ou simplesmente resíduo) é um dos melhores indicadores de qualidade do projeto e consiste na distância, medida em píxeis, entre onde o *PhotoModeler* espera que um ponto se encontre e onde o utilizador o marcou. Para um projeto ser considerado de boa qualidade, o resíduo máximo deve ser inferior a 10 píxeis, idealmente inferior a 5. Para projetos realizados com câmara calibrada, espera-se que o resíduo máximo seja menor que 3 píxeis.

Também é importante o erro total que mede como os dados de entrada “concordam” uns com os outros, devendo ser inferior a 1. Porém, como foi afirmado por Córdoba (2012), nem sempre é possível obter um erro total inferior a 1 devido à complexidade, tamanho e características do objeto em estudo.

### 4.2.1.2 Calibração

No *PhotoModeler*, a calibração da câmara pode ser realizada através de dois métodos: *Single Sheet Calibration* (calibração com folha única) ou *Multi-Sheet Calibration* (calibração com várias folhas). Em ambos os métodos são utilizadas folhas com padrões de alvos codificados que são reconhecidos nas fotografias de forma automática pelo programa.

A *Eos Systems* recomenda que se utilize o método da calibração com folha única caso o tamanho do objeto a ser fotografado seja inferior a um pé (30,48 cm). Dado que na presente dissertação foram fotografadas fachadas de edifícios e um monumento histórico, o método utilizado foi a calibração com várias folhas.

Para a calibração com várias folhas devem ser utilizadas seis a doze folhas, de tamanho A4, de modo a que cubram a área de calibração, que depende da distância focal da câmara e da distância a que a câmara se encontra das folhas. Opcionalmente, pode-se elevar ou baixar algumas das folhas relativamente às restantes. Essa diferença de nível entre os alvos é bastante útil podendo melhorar a qualidade da calibração e ajudar quando se tem câmaras com lentes com grandes distâncias focais (Manual do *PhotoModeler*, 2015).

É recomendado tirarem-se doze fotos, três em cada lado do arranjo. O primeiro conjunto é tirado em modo paisagem, o segundo e o terceiro são tirados em modo retrato virando a câmara 90° à direita e 90° à esquerda.

Após a recolha de fotografias, transferem-se as mesmas para o programa que referencia os pontos automaticamente, determinando os POI (distância focal, coordenadas do ponto principal, medidas do sensor e distorções da lente).

No *PhotoModeler*, pode também ser realizada uma calibração 3D, denominada *Field Calibration* (calibração *in situ*). Este método pode ser realizado individualmente para calibrar uma câmara, ou complementarmente com um dos dois métodos mencionados anteriormente (calibração com folha única e calibração com várias folhas), para afinar os POI. Uma calibração *in situ* é, portanto, um método onde a calibração ou a afinação dos parâmetros é realizada em simultâneo com o processamento de um projeto.

Quando é utilizada mais de uma câmara para o mesmo projeto, pode ser realizada a *Self-Calibration* (auto-calibração). A auto-calibração é semelhante à calibração *in situ*, diferindo apenas no facto de considerar que cada fotografia foi tirada com uma câmara diferente, calculando os parâmetros independentemente.

A calibração é considerada boa quando o resíduo máximo obtido é inferior a 1 píxel. Relativamente ao erro total, deve ser menor que 1 para que a calibração seja considerada boa, embora se espere que seja menor que 0,7 quando é utilizada uma câmara digital.

### 4.2.1.3 Resultados da calibração pelo *PhotoModeler*

A câmara foi calibrada através do método com várias folhas, com doze folhas, já abordado no parágrafo anterior.

As folhas foram dispostas como exemplificado na Figura 4-3.

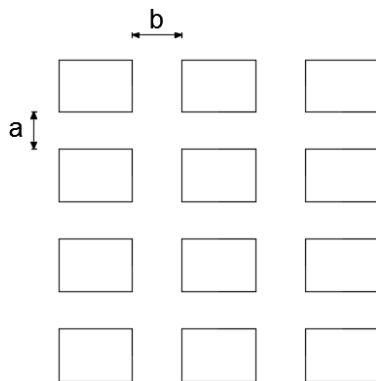


Figura 4-3: Disposição das 12 folhas para a calibração

Foram testadas vários modos para se definir qual reunia as condições para uma melhor calibração, nomeadamente alvos de diâmetros diferentes, espaçamentos diferentes e com e sem elevação de folhas. No final, após comparados os valores do resíduo máximo e do erro total de cada situação e de se definir qual a mais favorável, modificaram-se as fotografias no programa *GIMP*, impondo um aumento de contraste (Figura 4-4). No Quadro 4-1 apresentam-se os resultados obtidos de todas as calibrações, incluindo a comparação entre as fotografias originais e com contraste aumentado.

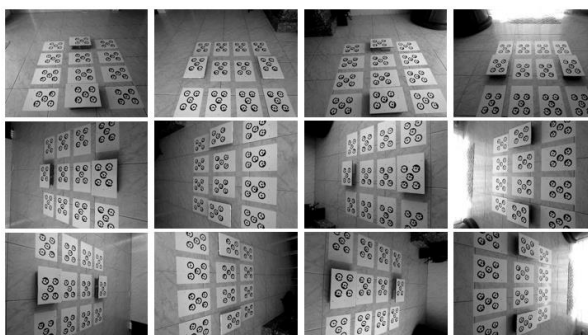


Figura 4-4: Fotografias utilizadas na calibração com contraste aumentado

Quadro 4-1: Resultados das calibrações

Condição	Resíduo máximo (píxeis)	Erro Total
Alvos de 9 mm	2,398	2,956
Alvos de 12 mm	1,637	2,461
a = 0,11m ; b = 0,15m	1,637	2,461
a = 0,05m ; b = 0,08m	1,072	2,132
Sem elevação de folhas	1,072	2,132
Com elevação de folhas	0,861	1,838
Sem contraste modificado no <i>GIMP</i>	0,861	1,838
Com contraste modificado no <i>GIMP</i>	0,789	1,810

A calibração efetuada com fotografias melhoradas pelo *GIMP* foi a que apresentou melhores resultados, tendo sido a escolhida. Após este processo, consultaram-se os POI e o tamanho do sensor obtidos da câmara calibrada, no relatório de projeto (Figura 4-5).

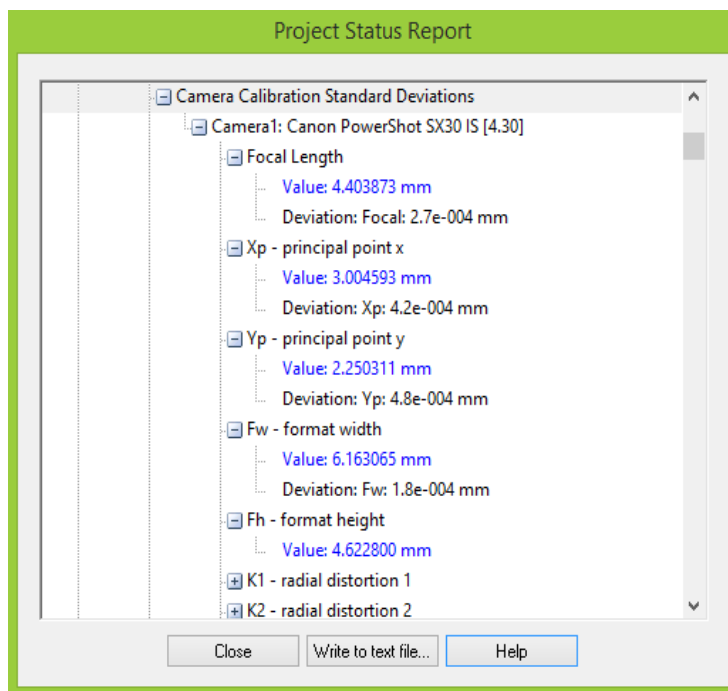


Figura 4-5: Relatório de projeto da calibração

Comparando com os valores do fabricante, verifica-se uma ligeira diferença (Quadro 4-2).

Quadro 4-2: Comparação dos valores do fabricante e valores determinado pela calibração

Característica da câmara	Valor do fabricante [mm]	Valor obtido após a calibração [mm]	Diferença absoluta [mm]
Distância focal	4,30	4,403873	0,103873
Largura do sensor (valor Fw no relatório)	6,17	6,163065	0,006935
Altura do sensor (valor Fh no relatório)	4,55	4,622800	0,072800

As coordenadas do ponto principal determinadas na calibração foram de 3,004593 mm em  $x$  e 2,250311 mm em  $y$ . Uma vez que não foram conhecidos os seus valores do fabricante, compararam-se com o centro geométrico. Considerando os valores do fabricante para as medidas do sensor, o centro geométrico tem de coordenadas 3,085 mm e 2,275 mm para  $x$  e  $y$ , respetivamente. A diferença absoluta das coordenadas do ponto principal é de 0,080407 mm e 0,024689 mm, para  $x$  e  $y$ , respetivamente.



## 5. Estudo-piloto

Neste capítulo é descrito o estudo-piloto que teve como objetivo testar os equipamentos de campo e gabinete com um levantamento acessível e onde fosse possível comprovar facilmente os resultados obtidos. Foi escolhida, para tal efeito, a fachada do Pavilhão de Madeiras da ESTGV. A sua escolha teve como factores o amplo parque de estacionamento que se encontra em frente à fachada, tendo espaço para o trabalho de campo, e o facto de a fachada ser simples, permitindo um trabalho de gabinete mais completo.

Após a restituição da fachada em *PhotoModeler*, seguiu-se o processo da texturização, onde foram aplicadas texturas à fachada com as fotografias inseridas no programa, tornando-a mais próxima da realidade. Por fim, apresenta-se a pormenorização do modelo através da exportação para um ficheiro *DXF* e posterior revisão em *AutoCAD*.

É também descrito o cálculo dos ângulos de rotação de algumas fotos através das equações de colinearidade e posterior comparação com os ângulos obtidos pelo *PhotoModeler*.

## 5.1 Procedimento e bases para os projetos

Na fase de campo, procurou-se tirar as fotografias com sobreposição suficiente, tanto lateral, 30%, como longitudinalmente, 60% (Figura 5-1).

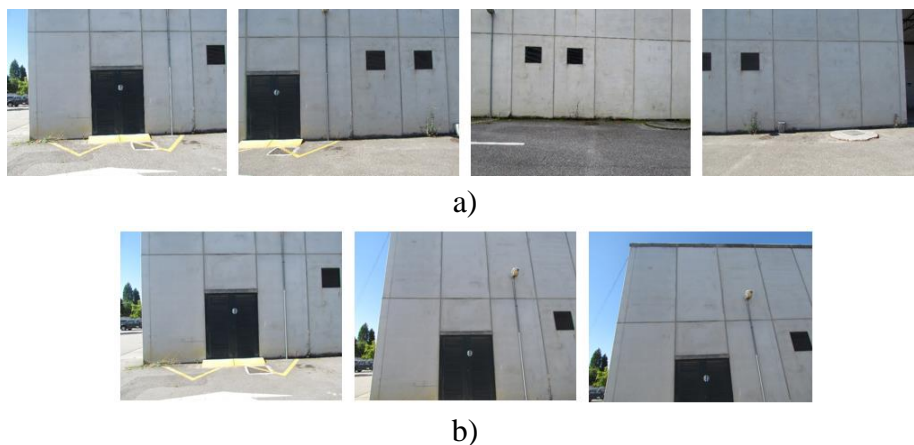


Figura 5-1: Exemplo de fotografias com sobreposição a) longitudinal e b) lateral

Inicialmente, as fotografias foram tiradas próximas ao edifício, para uma melhor visualização das mesmas, tendo sido feito um “varrimento” da fachada. Concluída essa etapa, tiraram-se fotografias a partir de uma maior distância, de modo a abranger melhor a fachada. No total foi tirado um conjunto de 54 fotografias.

Foram também tiradas medidas de uma porta com fita métrica (Figura 5-2) que serviram de comparação quando a revisão do modelo ficou concluída, medindo a mesma porta pelo *AutoCAD*.

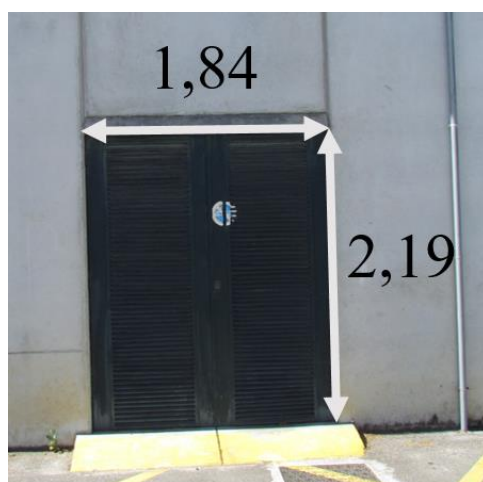


Figura 5-2: Valores, em metros, de largura e altura de porta, obtidos com fita métrica

Para a marcação dos pontos homólogos, foram traçados os contornos da fachada, janelas, portas e do pilar (Figura 5-3).

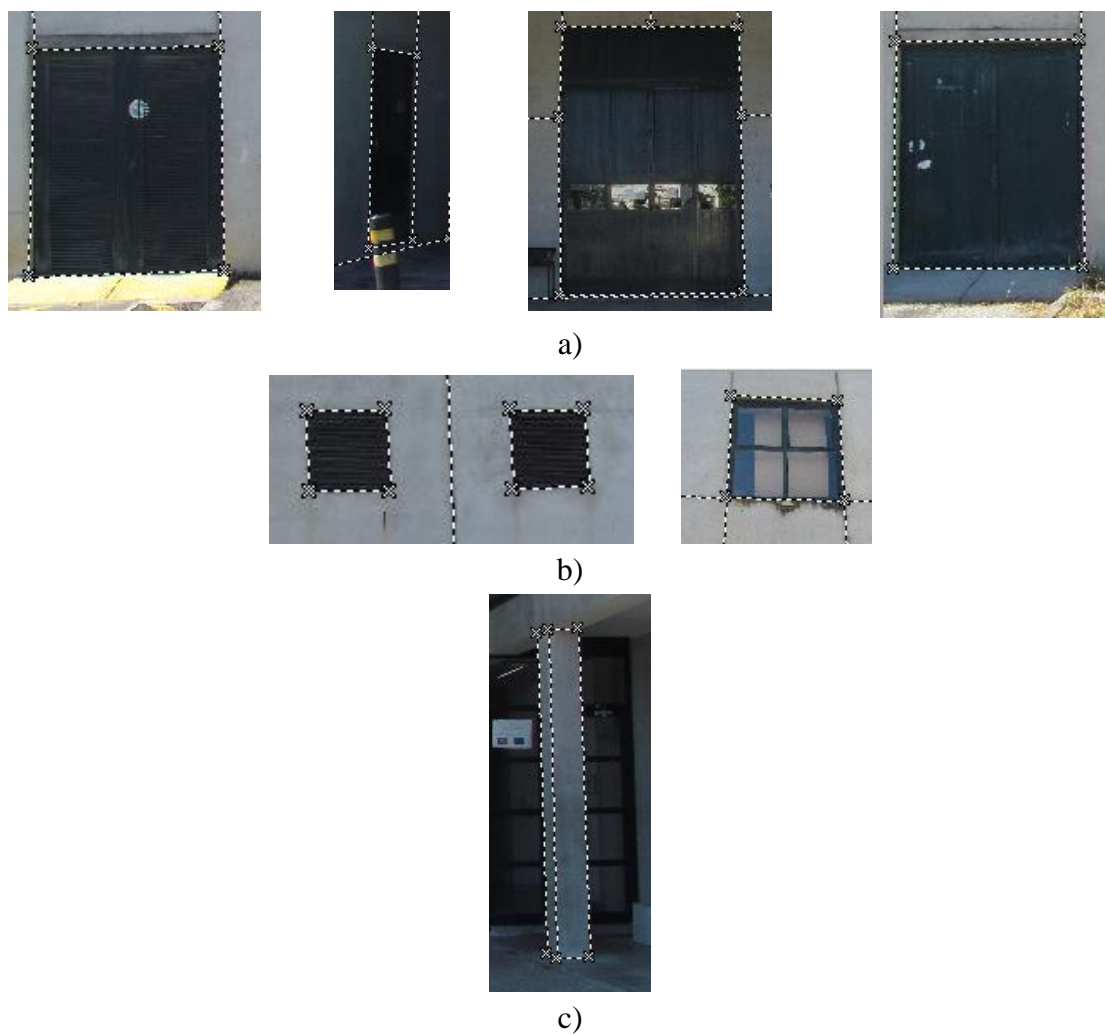


Figura 5-3: Traçado de a) portas, b) janelas e c) pilar

Foram executados três projetos diferentes:

- Com câmara desconhecida, isto é, sem calibração executada. Foram utilizadas apenas 5 fotografias para facilitar o processo (Figura 5-4);
- Com câmara calibrada para comparação de resultados com o ponto anterior. Foram utilizadas as mesmas 5 fotografias e mesmo traçado do ponto anterior (Figura 5-4);

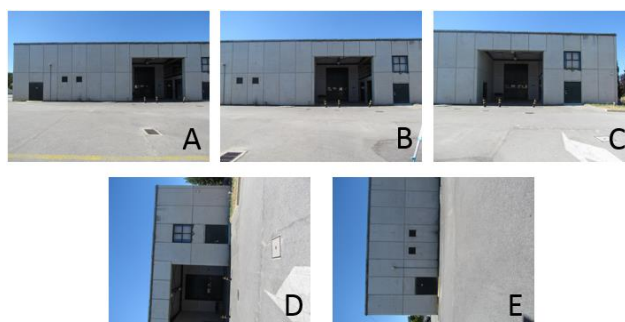


Figura 5-4: Conjunto de 5 fotografias, utilizadas inicialmente

- Com câmara calibrada com as 54 fotografias tiradas. Neste projeto, para que houvesse um maior rigor, foram também desenhadas as juntas (Figura 5-5), a parte interior da fachada (Figura 5-6) e os pormenores das portas e janelas.

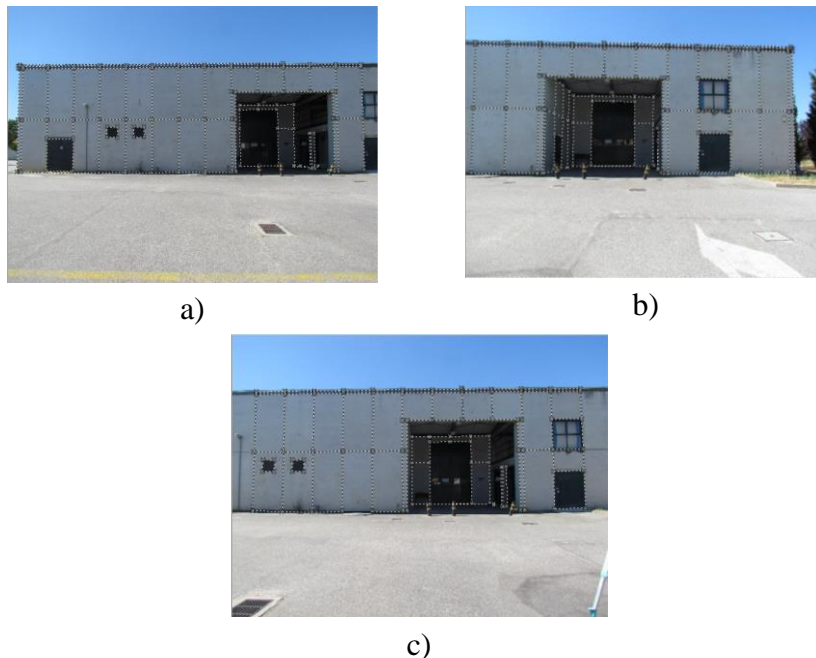


Figura 5-5: Exemplo do traçado dos contornos da fachada e juntas: a) lado esquerdo da fachada, b) lado direito da fachada e c) centro da fachada



Figura 5-6: Traçado da parte interior da fachada

Na Figura 5-7 encontra-se o traçado dos pormenores das portas e janelas. Nas três imagens inferiores foram desenhados apenas alguns dos pormenores, tendo o desenho sido completado em *AutoCAD*.

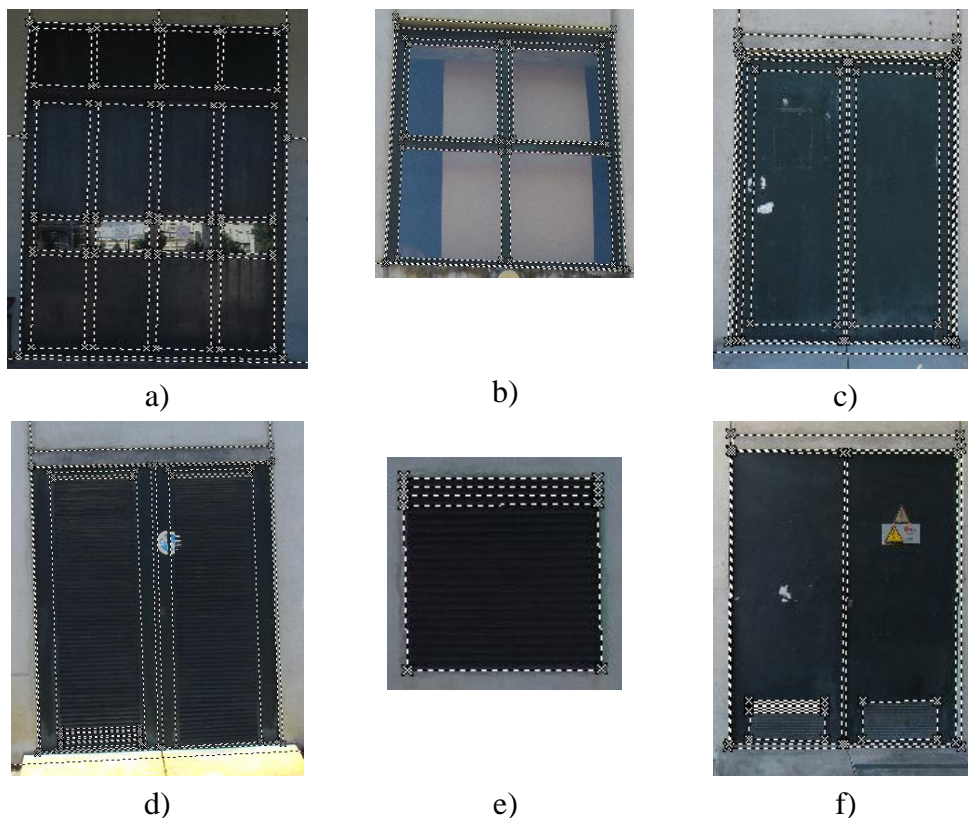


Figura 5-7: Traçado dos pormenores das portas e janelas: a) porta central, b) janela 1, c) porta exterior do lado direito, d) porta exterior do lado esquerdo, e) janela 2 e f) porta na reentrância

Foram definidos 12 pontos de controlo na fachada (Figura 5-8) cujas coordenadas, obtidas através da estação total, se apresentam no Quadro 5-1.

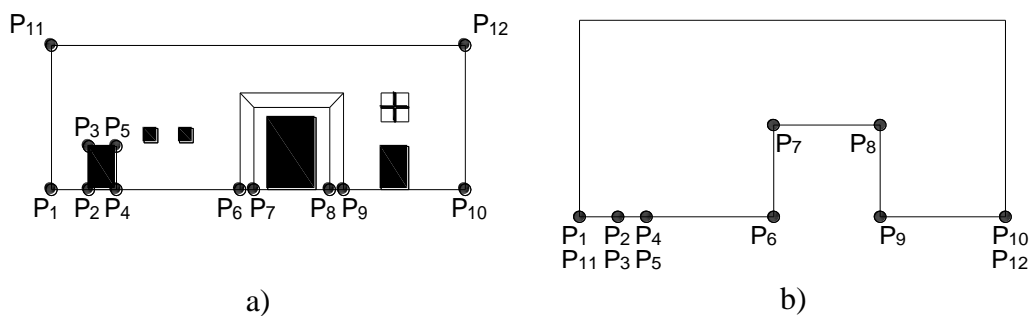


Figura 5-8: Localização dos pontos de controlo em a) alçado e em b) planta

Quadro 5-1: Coordenadas dos pontos de controlo, obtidas pela estação total

Ponto	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	-11,332	-19,106	0,153
2	-11,511	-17,052	0,246
3	-11,525	-17,050	2,421
4	-11,540	-15,335	0,235
5	-11,531	-15,310	2,420
6	-12,550	-4,320	0,142
7	-19,715	-4,971	0,157
8	-20,319	1,606	0,138
9	-13,164	2,280	0,131
10	-13,885	10,001	0,130
11	-11,232	-19,151	7,568
12	-13,896	9,958	7,562

Definiu-se um sistema de eixos com origem no canto inferior esquerdo da fachada (Figura 5-9) e converteram-se as coordenadas do Quadro 5-1 de acordo com esse sistema adotado.



Figura 5-9: Sistema de eixos adotado para a fachada

Os resultados da conversão de coordenadas encontram-se no Quadro 5-2.

Quadro 5-2: Coordenadas dos pontos de controlo, adaptadas para o sistema de eixos adotado

Ponto	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	0	0	0
2	2,064	0	0,095
3	2,064	0	2,176
4	3,781	0	0,095
5	3,781	0	2,176
6	14,843	0	0
7	14,843	7,195	0
8	21,447	7,195	0
9	21,447	0	0
10	29,202	0	0
11	0	0	7,432
12	29,202	0	7,432

## 5.2 Projeto com câmara desconhecida

Após a inserção das fotografias no programa, a adição de pontos de controlo e a picagem de pontos homólogos, procedeu-se ao processamento do projeto. No entanto, o programa não conseguiu orientar a fotografia E (Figura 5-10).

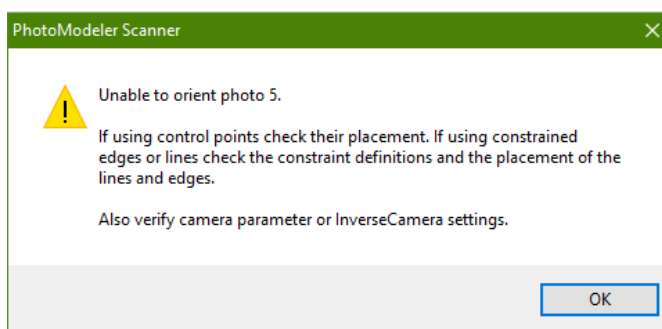


Figura 5-10: Erro de processamento

Desativou-se a fotografia em causa, para que não fosse utilizada no processamento. Concluído o processamento, verificou-se que os valores do erro total e do resíduo máximo foram superiores aos limites aceitáveis (Figura 5-11).

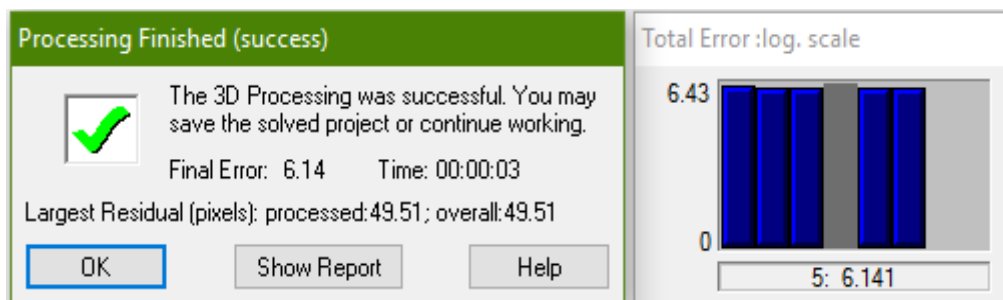


Figura 5-11: Mensagem de processamento do projeto não calibrado

Os pontos picados foram estudados, como recomendado no relatório, contudo não se encontrou nenhum erro.

O modelo desenhado (Figura 5-12) não se mostrou completo, o que seria de esperar, pois ao não ser utilizada a foto E, havia pouca informação dada ao programa relativamente a essa área da fachada.

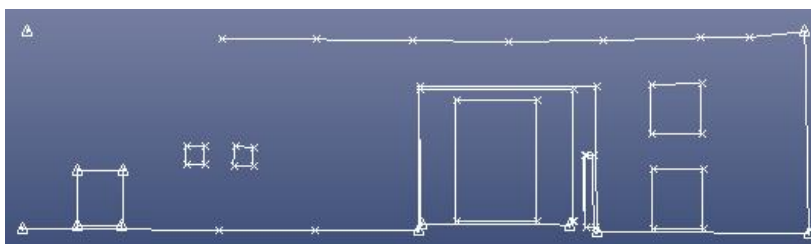


Figura 5-12: Modelo em estrutura de arame com área incompleta da fachada

### 5.3 Projeto com câmara calibrada

No primeiro projeto, realizado com as mesmas 5 fotografias do projeto com câmara não calibrada (Figura 5-4) testaram-se três hipóteses: sem adição de pontos de controlo, com os pontos de controlo (apenas foram adicionados os pontos 1, 3, 7, 8, 10, 12) de coordenadas do Quadro 5-1 e com os pontos de controlo de coordenadas do Quadro 5-2.

É de referir que embora o projeto com câmara calibrada tenha sido desenhado com o mesmo traçado que o projeto anterior, tiveram de ser executados em separado, visto que o programa não possibilita que uma câmara conhecida de um projeto seja “retirada” ou vice-versa e, portanto, não seria possível conseguir picar todos os pontos exatamente nos mesmos lugares. Contudo, mesmo sendo o traçado o mais semelhante possível, os valores apresentaram-se bastante diferentes (Figura 5-13).

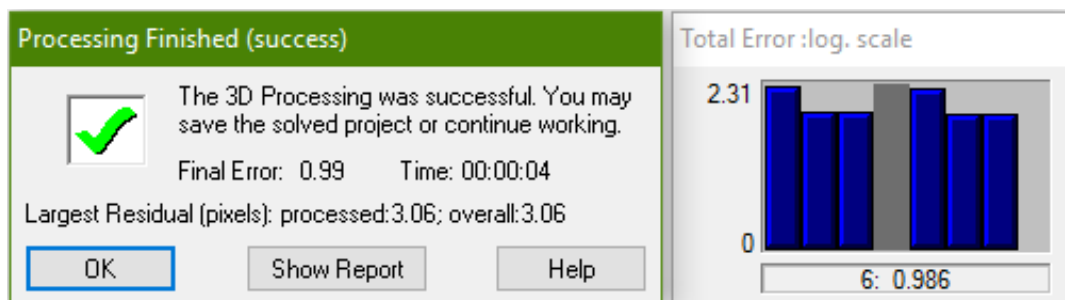


Figura 5-13: Mensagem de processamento do projeto com 5 fotografias

No relatório do projeto são apontados possíveis problemas e respectivas soluções (Figura 5-14).

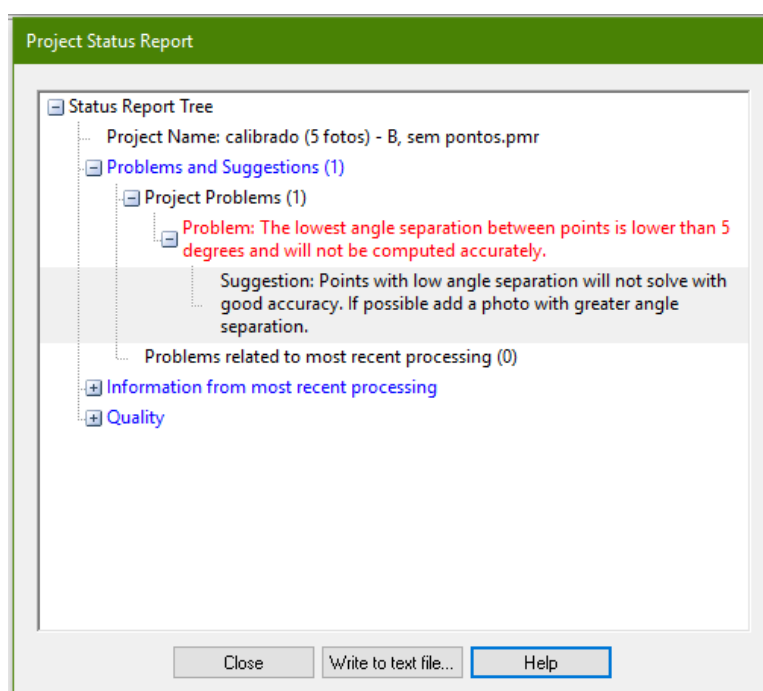


Figura 5-14: Relatório do processamento do projeto com 5 fotografias

O problema ocorrido menciona o baixo ângulo de separação entre pontos o que, segundo o programa, se irá traduzir numa menor precisão de cálculo. Isto significa que existem dois ou mais pontos pertencentes a planos diferentes que aparentam estar muito próximos nas fotografias, como se pode ver o exemplo na Figura 5-15, em duas perspectivas do mesmo pilar. A solução passa por tirar fotografias de várias perspectivas.

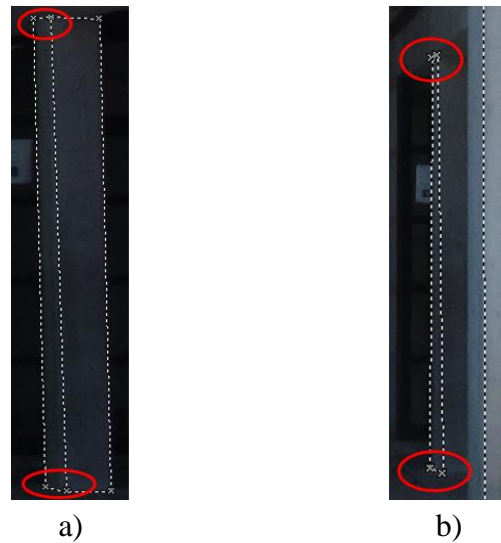


Figura 5-15: Pontos com baixo ângulo de separação entre si: a) foto B e b) foto C do mesmo pilar

A adição dos pontos de controlo não alterou o resultado do processamento, tendo sido obtido o mesmo resíduo máximo e o mesmo erro total.

No entanto, com a observação dos ângulos obtidos (do Quadro 5-3 ao Quadro 5-5) verificou-se como o *PhotoModeler* adapta a posição da câmara quando são adicionados pontos de controlo. No caso dos pontos de controlo de coordenadas relativas ao sistema de eixos adotado, o programa posicionou a câmara como uma câmara de fotografia terrestre efetuando uma rotação em torno do eixo  $X$ .

Quadro 5-3: Ângulos de rotação  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  em torno dos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , respetivamente, das fotografias no projeto sem pontos de controlo

Foto	$\omega$ [°]	$\phi$ [°]	$\kappa$ [°]
A	0,363	0,686	-0,170
B	1,442	-0,521	-0,295
C	0,607	-3,855	0,387
D	1,214	-6,187	-88,078
E	-5,264	-4,408	-89,585

Quadro 5-4: Ângulos de rotação  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  em torno dos eixos X, Y e Z, respectivamente, das fotografias no projeto com pontos de controle diretamente obtidos pela estação total

Foto	$\omega$ [°]	$\phi$ [°]	$\kappa$ [°]
A	-110,484	82,909	-159,611
B	-117,639	82,307	-152,642
C	-128,357	85,581	-141,264
D	-161,346	86,471	163,133
E	-42,848	85,744	43,832

Quadro 5-5: Ângulos de rotação  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  em torno dos eixos X, Y e Z, respectivamente, das fotografias no projeto com pontos de controle adaptados para o sistema de eixos adotado

Foto	$\omega$ [°]	$\phi$ [°]	$\kappa$ [°]
A	92,703	1,648	0,102
B	93,781	1,818	-0,067
C	92,962	-1,519	0,649
D	93,577	-3,849	-87,840
E	87,106	-2,111	-89,085

Da Figura 5-16 à Figura 5-20 encontram-se demonstrações das rotações de cada fotografia relativas ao Quadro 5-5. Os esboços foram desenhados em *AutoCAD*, tendo em conta que o programa executa as rotações na sequência  $\kappa$ - $\phi$ - $\omega$ .

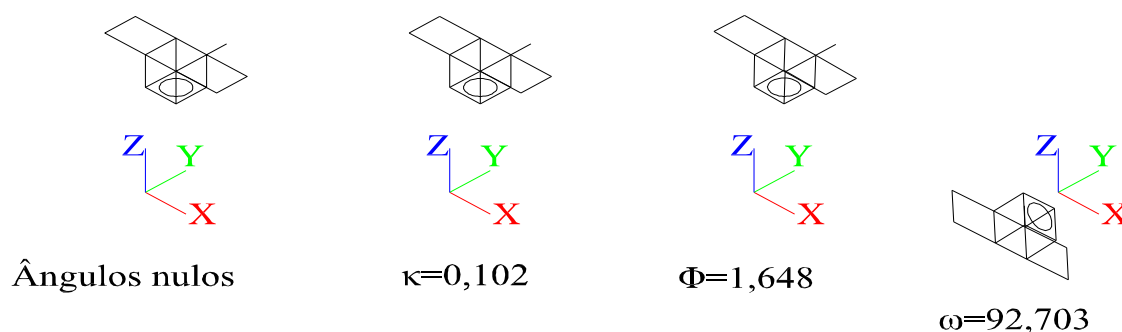


Figura 5-16: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia A

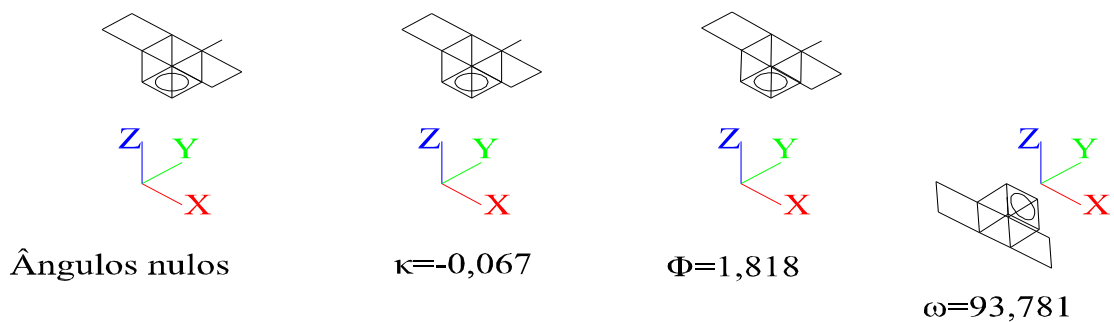


Figura 5-17: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia B

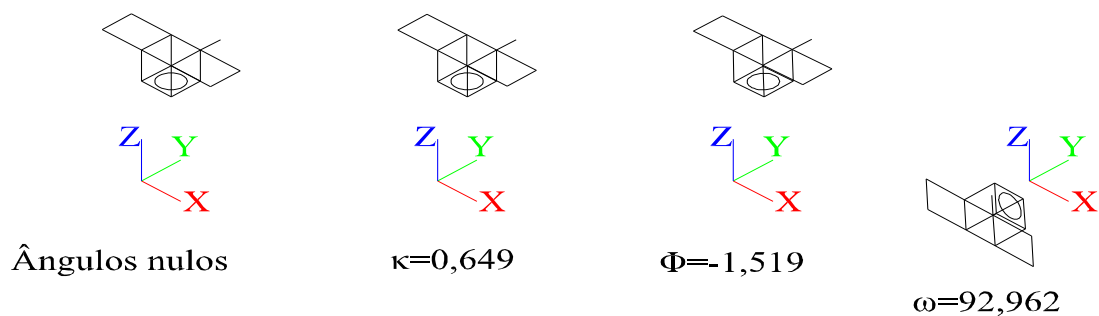


Figura 5-18: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia C

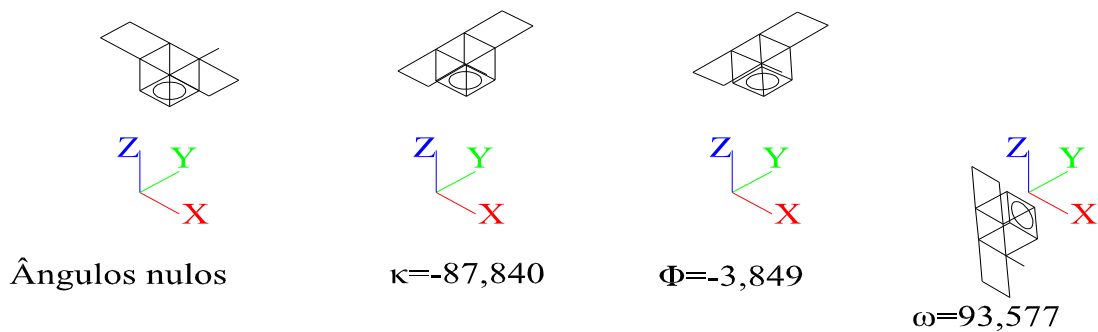


Figura 5-19: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia D

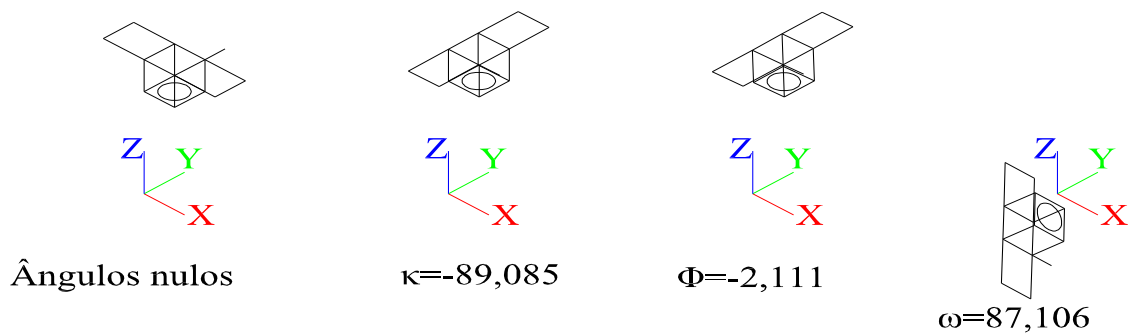


Figura 5-20: Esboço representativo das rotações efetuadas na fotografia E

Antes da adição de fotografias, verificou-se que o modelo em estrutura de arame (Figura 5-21) apresentou melhor desenho comparado com o modelo obtido no projeto com câmara desconhecida.

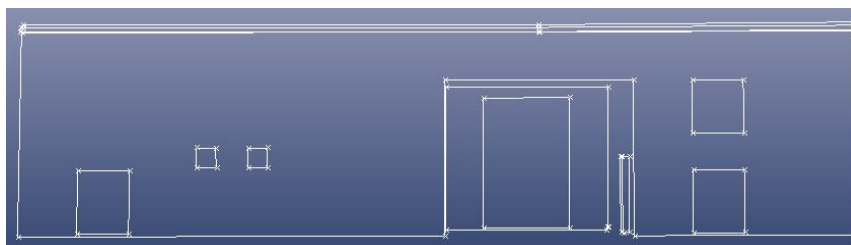


Figura 5-21: Modelo da fachada em estrutura de arame do projeto com 5 fotografias

A adição de mais fotografias resultou em valores superiores de erro total e de resíduo máximo (Figura 5-22) relativamente aos obtidos com 5 fotografias.

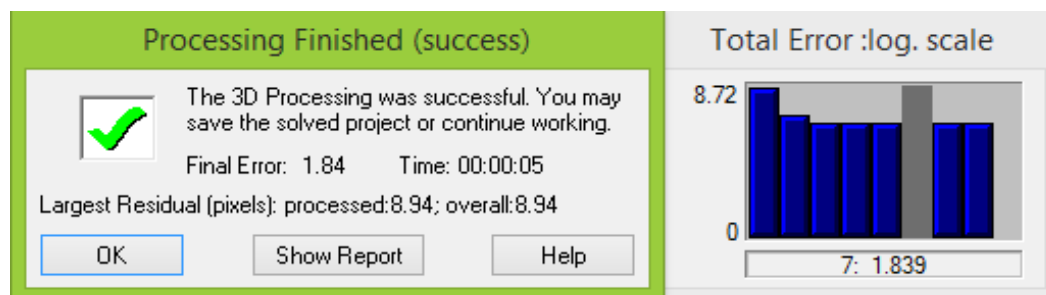


Figura 5-22: Mensagem de processamento do projeto com 54 fotografias

Embora o valor do resíduo máximo seja um valor aceitável por ser inferior a 10 píxeis, pôde-se constatar no relatório (Figura 5-23) que esse é um problema apresentado pelo projeto, por ser superior a 5 píxeis.

Por terem sido tiradas fotografias com outros pontos de vista, a questão relativa aos ângulos do projeto anterior deixou de ser apontada como problema neste projeto. Por exemplo, na Figura 5-15, os pontos do pilar aparecem com uma maior distância nas outras fotografias.

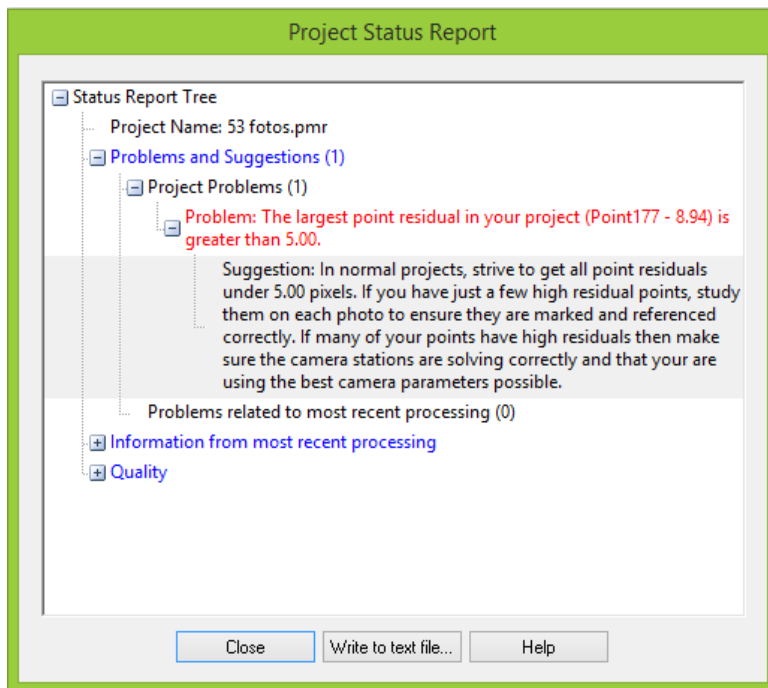


Figura 5-23: Relatório do processamento do projeto com 54 fotografias

O modelo 3D em estrutura de arame (Figura 5-24) é constituído pelas linhas desenhadas nos traçados, sendo possível, após definir coordenadas de alguns dos pontos, obter qualquer medida pretendida.

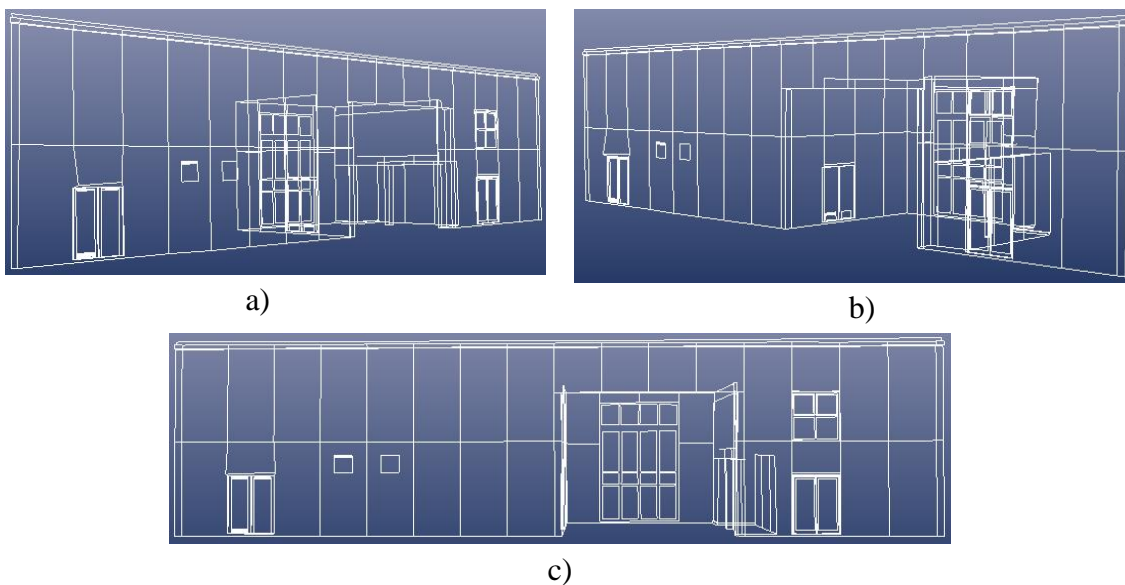


Figura 5-24: Modelo da fachada em estrutura de arame do projeto com 54 fotografias: a) vista em perspectiva do lado esquerdo, b) vista em perspectiva do lado direito e c) vista em alçado

### 5.3.1 Texturização do modelo

As superfícies desenhadas no estudo-piloto foram planas, sem forma definida. Na Figura 5-25 encontram-se os diferentes passos para a texturização.

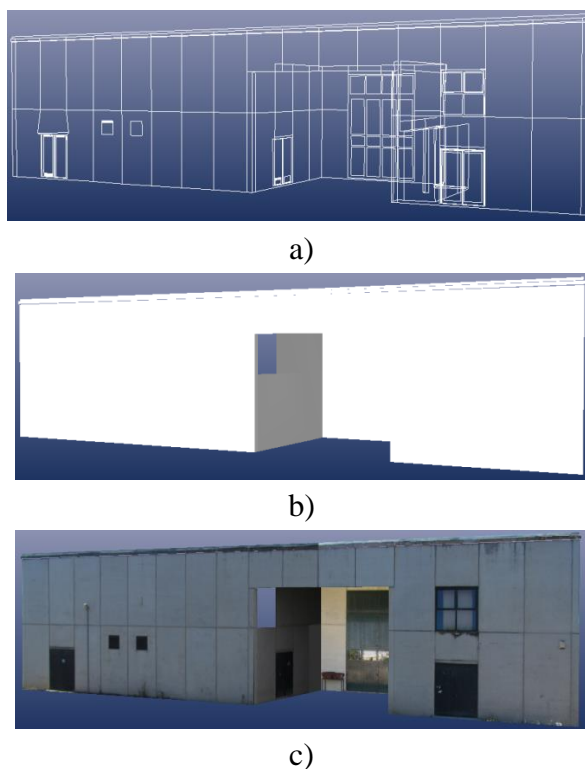


Figura 5-25: Fases da texturização do modelo: a) estrutura de arame inicial, b) sombreado (com superfícies) e c) texturização

Pelo facto da atribuição das fotografias às superfícies a texturizar ser, inicialmente, automática, é natural que ocorram alguns erros de interpretação. Na Figura 5-26 observa-se um desses erros causados por um grelhador.



Figura 5-26: Erro de interpretação causado por grelhador no local

Para a correção deste tipo de erros deve-se escolher quais as fotografias que se pretende que definam a área em questão. Para a situação da Figura 5-26 impôs-se que a área em causa seria definida por uma fotografia tomada de um ângulo que não evidenciasse o grelhador (Figura 5-27).



Figura 5-27: Fotografia escolhida para a correção do erro causado por grelhador no local

Na Figura 5-28 apresenta-se a correção aplicada após a atualização de texturas.



Figura 5-28: Correção resultante do erro causado por grelhador no local

É também visível uma falha causada pela insuficiência de fotografias nessa zona e consequente não picagem de pontos homólogos. Essa falha foi corrigida em *AutoCAD*.

O resultado final texturizado acabou por atender às expectativas, mostrando-se bastante semelhante com a realidade (Figura 5-29).

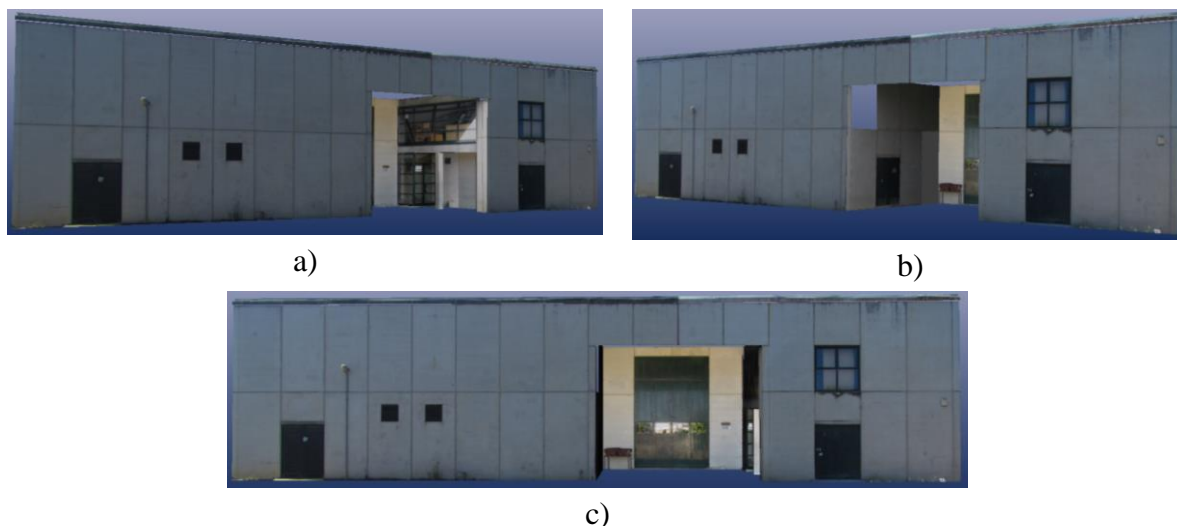


Figura 5-29: Modelo da fachada texturizado: a) vista lateral esquerda, b) vista lateral direita e c) vista em alçado

### 5.3.2 Revisão no *AutoCAD*

Como mencionado anteriormente, os pormenores das portas e janelas não foram desenhados na sua totalidade no *PhotoModeler* (Figura 5-7), tendo apenas sido desenhadas algumas linhas para se ter uma noção dos seus padrões geométricos. No *AutoCAD*, os detalhes das portas (Figura 5-30) e janelas incompletas foram finalizados.

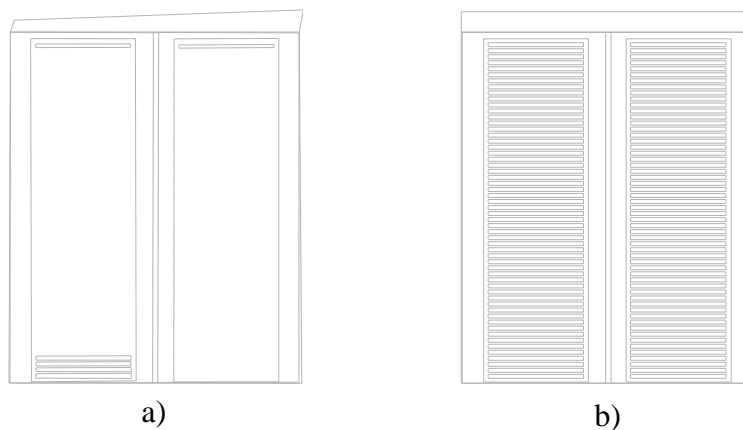


Figura 5-30: Exemplo de porta revista e com detalhes completados: a) antes e b) depois

Também a falha comentada na observação da Figura 5-28 foi corrigida no *AutoCAD* (Figura 5-31).

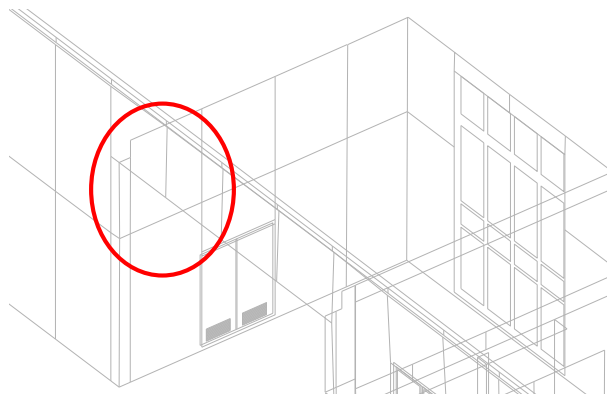


Figura 5-31: Correção de falha, assinalada a vermelho

Na Figura 5-32 apresenta-se o modelo final revisto no *AutoCAD* com as alturas e larguras da fachada e de duas das portas cotadas.

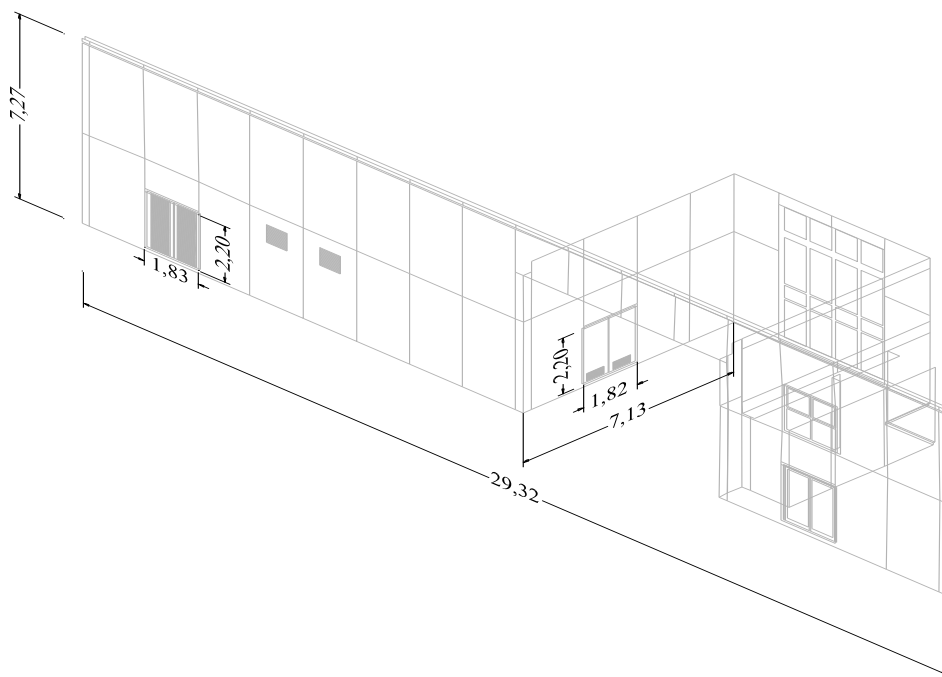


Figura 5-32: Modelo da fachada revisto com algumas cotagens, em metros

Relembrando que se obtiveram as medidas  $1,84 \times 2,19$  m da porta com fita métrica, conclui-se que não houve grandes diferenças com as medidas resultantes do método fotogramétrico.

## 5.4 Cálculo dos ângulos de rotação (comparação com resultados do *PhotoModeler*)

Os cálculos efetuados neste parágrafo são referentes às 5 fotografias da Figura 5-4.

Para os POE, foram consideradas como aproximações iniciais dos ângulos de rotação os valores mencionados no Capítulo 3:  $\omega_0 = 90^\circ$ ,  $\phi_0 = 0$  e  $\kappa_0 = 0$  para as fotografias em modo paisagem (fotos A, B e C) e  $\omega_0 = 90^\circ$ ,  $\phi_0 = 0$  e  $\kappa_0 = -90^\circ$  para as fotografias em modo retrato (fotos D e E). As coordenadas  $X_C$ ,  $Y_C$  e  $Z_C$  foram calculadas como valores fixos para cada fotografia a partir dos dados registados com a estação total (Quadro 5-6).

Quadro 5-6: Coordenadas do centro de perspectiva, adaptadas para o sistema de eixos adotado

Foto	$X_C$ [m]	$Y_C$ [m]	$Z_C$ [m]
A	12,161	-17,811	1,309
B	15,844	-15,875	1,287
C	19,768	-14,397	1,279
D	21,700	-13,515	1,229
E	5,865	-15,014	1,344

Relativamente aos pontos de controlo, foram considerados 4 pontos de controlo nas fotos A, C, D e E e 3 para a foto B (Quadro 5-7).

Quadro 5-7: Pontos de controlo utilizados em cada fotografia

Foto	Pontos de controlo
A	5, 6, 8, 11
B	6, 8, 9
C	6, 8, 10, 10
D	7, 9, 10, 12
E	1, 2, 5, 11

Sendo as suas coordenadas no espaço-objeto conhecidas (Quadro 5-2), foram calculadas as suas correspondentes no espaço-imagem, recorrendo ao *GIMP*. No entanto, os valores iniciais retirados do *GIMP*,  $x_G$  e  $y_G$ , tiveram de ser submetidos a duas conversões para que pudessem ser utilizados nas equações de colinearidade.

Em primeiro, é importante distinguir os contextos de fotografia, havendo a fotografia visualizada no ecrã de computador e a fotografia contida no sensor. Foi realizada uma conversão de ajuste de medidas, já que o pretendido era que as coordenadas fossem do contexto

do sensor. Como tal, era necessário saber as medidas do sensor,  $L_s$  (largura do sensor) e  $A_s$  (altura do sensor), e das fotografias quando observadas em ecrã de computador,  $L_e$  (largura da foto no ecrã) e  $A_e$  (altura da foto no ecrã).

As medidas do sensor são  $6,17 \times 4,55$  mm, como referido no parágrafo 4.1. As medidas das fotografias em contexto de ecrã foram obtidas através do *GIMP*, onde facilmente se obtiveram as medidas na unidade pretendida: a largura é de 609,6 mm e a altura 457,2 mm.

As novas coordenadas convertidas,  $x_{sensor}$  e  $y_{sensor}$ , calcularam-se do seguinte modo a partir das coordenadas iniciais do ponto,  $x_G$  e  $y_G$ , no espaço-imagem:

$$x_{sensor} = \frac{x_G \times L_s}{L_e} \quad (5-1)$$

$$y_{sensor} = \frac{y_G \times A_s}{A_e} \quad (5-2)$$

Como o sistema de eixos no *GIMP*, tal como no *PhotoModeler*, tem a sua origem no canto superior esquerdo da fotografia, com o eixo  $y$  no sentido descendente, foi necessário uma translação de sistema de eixos, seguida de uma rotação de  $180^\circ$  em torno do eixo  $x$ . O segundo passo, consistiu então na conversão das coordenadas  $x_{sensor}$  e  $y_{sensor}$  para o sistema de eixos pretendido, onde a origem coincide com o centro geométrico do sensor e o sentido do eixo  $y$  é ascendente (Figura 5-33).

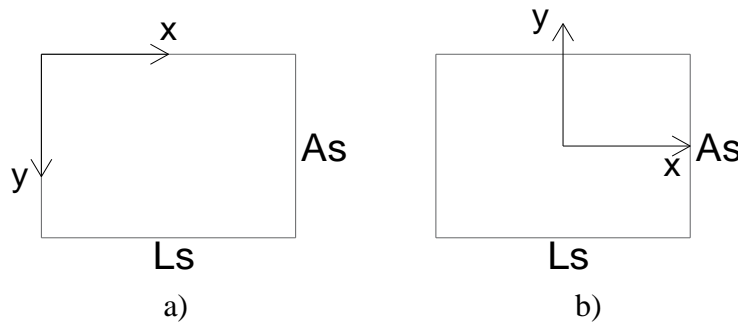


Figura 5-33: a) Sistema de eixos inicial e b) Sistema de eixos pretendido.

Arbitrou-se o ponto principal coincidente com o centro geométrico do sensor, então assumiu-se, no sistema de eixos inicial, os valores 3,085 mm e 2,275 mm para as coordenadas  $x_c$  e  $y_c$ , respetivamente, sendo nulas no sistema de eixos pretendido. As conversões dos valores das coordenadas do sistema de eixos inicial para o sistema de eixos pretendido foram realizadas pelas equações a seguir:

$$x_p = x_{sensor} - x_c \quad (5-3)$$

$$y_p = y_c - y_{sensor} \quad (5-4)$$

O resultado final das conversões das coordenadas apresentam-se no Quadro 5-8.

Quadro 5-8: Redução final das coordenadas dos pontos de controlo, no espaço-imagem

Foto	Ponto de controlo	$(x_G, y_G)$ [mm]	$(x_{sensor}, y_{sensor})$ [mm]	$(x_p, y_p)$ [mm]
A	5	106,8; 218,3	1,0810; 2,1725	-2,0040; 0,1025
	6	376,2; 273,1	3,8077; 2,7179	0,7227; -0,4429
	8	471,3; 263,5	4,7702; 2,6223	1,6852; -0,3473
	11	18,3; 103,0	0,1852; 1,0250	-2,8998; 1,2500
B	6	283,9; 285,0	2,8735; 2,8363	-0,2115; -0,5613
	8	417,0; 273,6	4,2206; 2,7228	1,1356; -0,4478
	9	466,9; 283,9	4,7257; 2,8253	1,6407; -0,5503
C	6	130,0; 281,8	1,3158; 2,8044	-1,7692; -0,5294
	8	315,6; 269,8	3,1943; 2,6850	0,1093; -0,4100
	10	556,8; 280,5	5,6356; 2,7915	2,5506; -0,5165
	12	551,6; 76,2	5,5830; 0,7583	2,4980; 1,5167
D	7	344,2; 406,3	3,4838; 4,0434	0,3988; -1,7684
	9	362,3; 267,8	3,6670; 2,6651	0,5820; -0,3901
	10	366,5; 25,8	3,7095; 0,2568	0,6245; 2,0182
	12	149,6; 24,8	1,5142; 0,2468	-1,5708; 2,0282
E	1	318,2; 414,5	3,2206; 4,1251	0,1356; -1,8501
	2	316,0; 353,9	3,1984; 3,5220	0,1134; -1,2470
	5	252,6; 300,8	2,5567; 2,9935	-0,5283; -0,7185
	11	104,8; 415,1	1,0607; 4,1310	-2,0243; -1,8560

Os POI são valores comuns nas 5 fotografias, sendo a distância focal 4,3 mm e as coordenadas do ponto principal nulas, como referido anteriormente. Para os presentes cálculos não se consideraram as distorções da lente.

As equações de colinearidade foram resolvidas como se as coordenadas dos pontos de controlo no espaço-imagem fossem incógnitas. O objetivo era ajustar os valores dos ângulos de rotação de modo a aproximar as supostas incógnitas aos valores das coordenadas dos pontos de controlo calculados anteriormente (última coluna do Quadro 5-8).

Como exemplo, apresenta-se a aplicação das equações de colinearidade (3-15) ao ponto 5 da foto A:

$$\begin{cases} x_p = -4,30 \frac{m_{11}(3,781 - 12,161) + m_{12}(0 + 17,811) + m_{13}(2,176 - 1,309)}{m_{31}(3,781 - 12,161) + m_{32}(0 + 17,811) + m_{33}(2,176 - 1,309)} \\ y_p = -4,30 \frac{m_{21}(3,781 - 12,161) + m_{22}(0 + 17,811) + m_{23}(2,176 - 1,309)}{m_{31}(3,781 - 12,161) + m_{32}(0 + 17,811) + m_{33}(2,176 - 1,309)} \end{cases} \quad (5-5)$$

Os valores iniciais adotados para os ângulos de rotação foram  $\omega_0 = 90^\circ$ ,  $\phi_0 = 0$  e  $\kappa_0 = 0$ , resultando nos seguintes valores para os coeficientes  $m_{ij}$ :

- $m_{11} = \cos 0^\circ \cos 0^\circ$ ;
- $m_{12} = \cos 90^\circ \sin 0^\circ + \sin 90^\circ \sin 0^\circ \cos 0^\circ$ ;
- $m_{13} = \sin 90^\circ \sin 0^\circ - \cos 90^\circ \sin 0^\circ \cos 0^\circ$ ;
- $m_{21} = -\cos 0^\circ \sin 0^\circ$ ;
- $m_{22} = \cos 90^\circ \cos 0^\circ - \sin 90^\circ \sin 0^\circ \sin 0^\circ$ ;
- $m_{23} = \sin 90^\circ \cos 0^\circ + \cos 90^\circ \sin 0^\circ \sin 0^\circ$ ;
- $m_{31} = \sin 0^\circ$ ;
- $m_{32} = -\sin 90^\circ \cos 0^\circ$ ;
- $m_{33} = \cos 90^\circ \cos 0^\circ$ .

Para a execução dos cálculos utilizou-se o Excel, resultando nos valores do Quadro 5-9.

Quadro 5-9: Valores dos ângulos de rotação, obtidos por resolução das equações de colinearidade

Foto	$\omega$ [°]	$\phi$ [°]	$\kappa$ [°]
A	91,734	0,513	-0,964
B	92,804	1,062	-0,429
C	92,145	-2,936	0,825
D	92,700	-3,850	-87,891
E	86,887	-1,816	-89,559

Comparando com o Quadro 5-5 verifica-se uma ligeira diferença de valores. O ângulo  $\phi$  da foto C foi o ângulo que apresentou maior diferença (1,417°).

No Quadro 5-10 apresentam-se as diferenças entre as coordenadas do Quadro 5-8 e as coordenadas obtidas pelas equações de colinearidade.

Quadro 5-10: Comparação entre os valores das coordenadas dos pontos de controlo determinados inicialmente e resultantes das equações de colinearidade, no espaço-imagem

Foto	Ponto de controlo	Coordenadas $(x_p, y_p)$ determinadas inicialmente [mm]	Coordenadas $(x_p, y_p)$ resultantes das equações de colinearidade [mm]
A	5	-2,0040; 0,1025	-1,9753; 0,0455
	6	0,7227; -0,4429	0,6961; -0,4362
	8	1,6852; -0,3473	1,6497; -0,3293
	11	-2,8998; 1,2500	-2,8732; 1,2781
B	6	-0,2115; -0,5613	-0,1884; -0,5623
	8	1,1356; -0,4478	1,1366; -0,4453
	9	1,6407; -0,5503	1,6200; -0,5531
C	6	-1,7692; -0,5294	-1,7357; -0,5304
	8	0,1093; -0,4100	0,1083; -0,4172
	10	2,5506; -0,5165	2,5154; -0,5641
	12	2,4980; 1,5167	2,4955; 1,5637
D	7	0,3988; -1,7684	0,4058; -1,7741
	9	0,5820; -0,3901	0,5844; -0,3926
	10	0,6245; 2,0182	0,6506; 2,0113
	12	-1,5708; 2,0282	-1,6019; 2,0374
E	1	0,1356; -1,8501	0,1382; -1,8342
	2	0,1134; -1,2470	0,1149; -1,2324
	5	-0,5283; -0,7185	-0,4816; -0,7355
	11	-2,0243; -1,8560	-2,0635; -1,8646

## 5.5 Observações finais

Ficou comprovado neste estudo a influência da calibração da câmara, pois projetos idênticos resultaram em resíduos máximos consideravelmente diferentes, além de que com a câmara calibrada o programa não encontrou entraves na orientação das fotografias.

Para a recolha de fotografias, é importante que sejam tiradas de vários ângulos para não haver problemas com baixos ângulos de separação, o que pode gerar má interpretação de localização de pontos. Também devem ser tiradas fotografias de cada área do objeto que se pretende

estudar, para que não ocorram falhas pela falta de pontos marcados. Porém, convém notar que a quantidade de fotografias não significa um resíduo máximo menor, mas sim uma melhor visualização de detalhes.

Apenas quando se converteu o modelo em *AutoCAD* se observou o quão imperfeito o desenho estava, com a não-perpendicularidade das linhas. Por essa razão, é preciso ter atenção com o modelo resultante visualizado no *PhotoModeler*, que pode induzir em erro quanto à exatidão do desenho.

A adição de pontos de controlo pode ser importante caso se pretenda conhecer os ângulos de rotação de cada fotografia, impondo assim o sistema de eixos pretendido.

Relativamente aos cálculos efetuados dos ângulos de rotação, essa etapa teve apenas como objetivo a comparação com os ângulos calculados pelo *PhotoModeler*. Acredita-se que as diferenças de valores tenham sido causadas por erros de medição com a estação total e na picagem dos pontos no programa.

## 6. Casos práticos

Neste capítulo são apresentados dois casos práticos de aplicação da fotogrametria ao levantamento de fachadas e monumentos. Os casos foram estudados com o mesmo procedimento do estudo-piloto, isto é, restituíram-se os modelos no *PhotoModeler*, texturizaram-se os mesmos e, por fim, foi feita uma revisão no *AutoCAD*. Contudo, a revisão no *AutoCAD* teve objetivos diferentes dos levantamentos. Na fachada, o objetivo foi o mesmo do estudo-piloto, ou seja, corrigir alguns pormenores. Relativamente ao objetivo da revisão do monumento no *AutoCAD* foi o de completar a sua abóbada, para que não fosse apresentado de um modo tão superficial.

### 6.1 Fachada de um edifício antigo

A fachada escolhida para o trabalho foi de um edifício de habitação e comércio, localizado na Rua das Ameias da zona histórica da cidade de Viseu.

A sua escolha deveu-se ao facto de se encontrar próximo à Sé, um importante marco da cidade.

#### 6.1.1 Levantamento fotogramétrico

##### 6.1.1.1 Trabalho em fase de campo

Mais uma vez, houve o cuidado de se tirarem fotografias com as sobreposições mínimas longitudinal e lateral de 60% e 30%, respetivamente. No total recolheram-se 36 fotografias.

Como pontos de controlo, foram escolhidos os 4 cantos da fachada, a campainha, um dos ventiladores, 4 cantos de uma das janelas e o canto inferior esquerdo das restantes janelas (Figura 6-1).

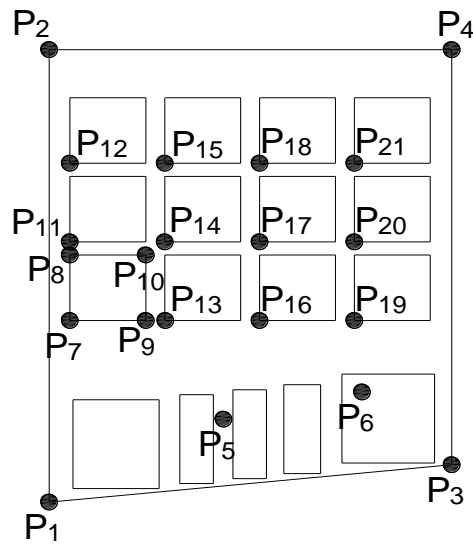


Figura 6-1: Localização dos pontos de controle na fachada

Foram também registadas medidas com uma fita, para mais tarde comparar com as medidas obtidas pelo *PhotoModeler* (Figura 6-2).

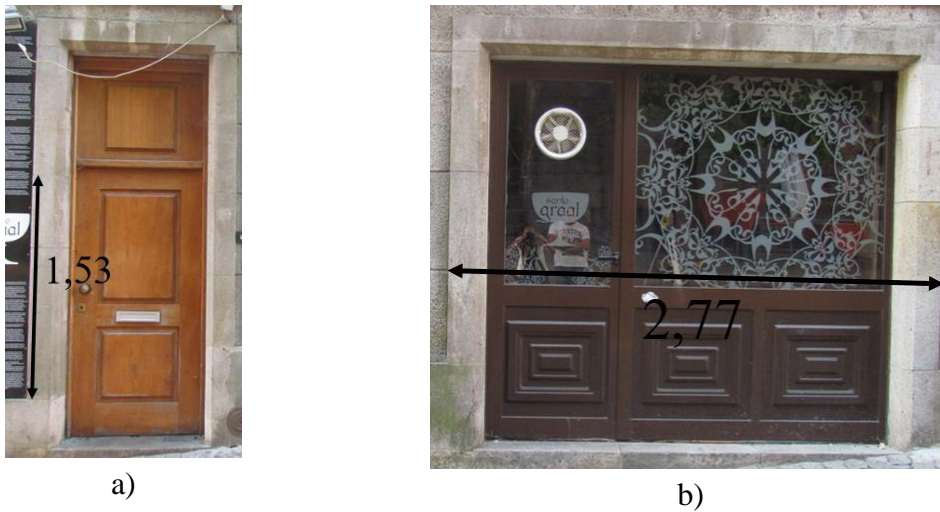


Figura 6-2: Medidas obtidas, em metros, com fita métrica: a) altura entre juntas de ombreira e b) largura de porta

### 6.1.1.2 Trabalho em fase de gabinete

Para esta fase foram utilizadas as 36 fotografias tiradas em campo.

Uma das portas da fachada tem a sua reentrância arredondada (Figura 6-3), porém no *PhotoModeler* foi desenhada com o mesmo padrão de geometria das restantes portas.

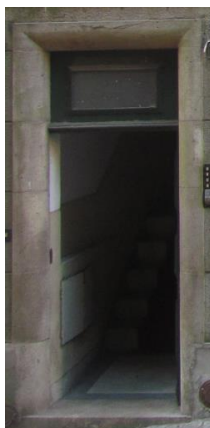


Figura 6-3: Porta com reentrância arredondada

Quando se terminou o traçado processou-se o projeto e verificou-se na mensagem de processamento que os valores do erro total e do resíduo máximo eram elevados para os padrões aceitáveis (Figura 6-4).

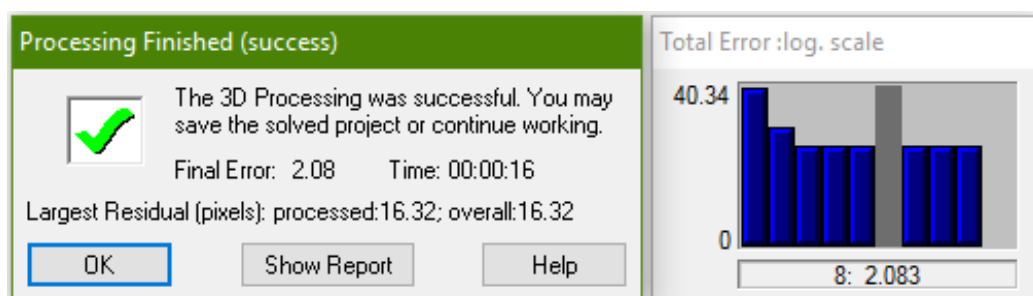


Figura 6-4: Mensagem de processamento final

Numa tentativa de diminuir o resíduo máximo, foram ajustados alguns pontos até se obter o menor resíduo máximo possível. A tarefa revelou-se demorada, pois no instante em que era exibido um ponto como tendo o resíduo máximo do projeto, todos os seus pontos correspondentes deveriam ser analisados.

Também os pontos da porta da Figura 6-3 se revelaram críticos, pelo facto de não corresponderem à realidade, isto é, os pontos marcados eram considerados pontos “fictícios”. O valor mínimo de resíduo máximo que se conseguiu obter foi de 9,99 píxeis, muito próximo do máximo aceitável que é de 10 píxeis.

No final, foram adicionados os pontos de controlo para escalar o modelo. As suas coordenadas não foram adaptadas para um sistema novo, tendo sido assumidos os valores obtidos com a estação total como coordenadas finais.

Para as texturas, teve-se o cuidado de criar as superfícies curvas na porta da Figura 6-3 (Figura 6-5).

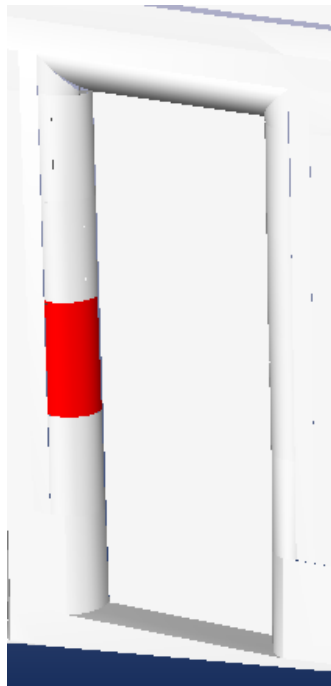


Figura 6-5: Porta com reentrância redonda sombreada

Em *AutoCAD*, a porta foi desenhada com a ferramenta *Spline* do *AutoCAD* (Figura 6-6).

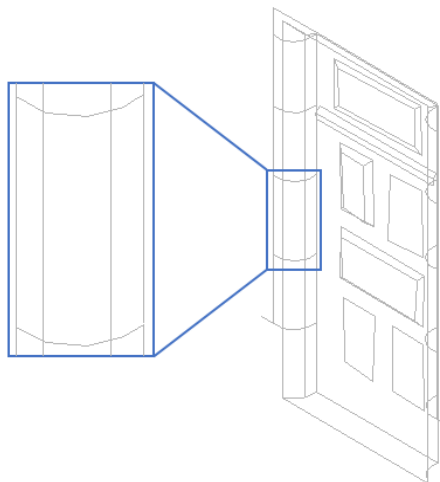


Figura 6-6: Porta com reentrância redonda desenhada em *AutoCAD*

Terminada a revisão das portas, completaram-se os seus pormenores (Figura 6-7).

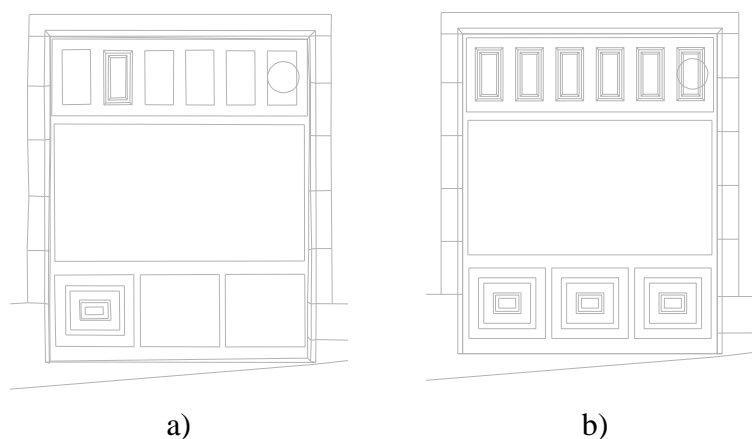


Figura 6-7: Exemplo de porta revista e com detalhes completados: a) antes e b) depois

Para a revisão das janelas, foi revista apenas uma (detalhes de envidraçado, ombreiras, verga e contra-verga) e copiou-se a janela revista, tendo como base as localizações indicadas no *PhotoModeler* para as restantes janelas.

As caleiras e as suas ligações foram desenhadas no *AutoCAD*, recorrendo a pequenas retas de referência previamente marcadas no *PhotoModeler*. Na Figura 6-8 observa-se parte das caleiras lateral esquerda e superior desenhadas e a ligação das mesmas.

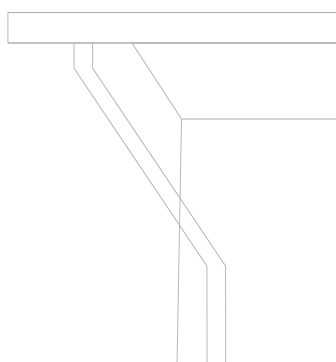


Figura 6-8: Ligação da caleira lateral esquerda à superior

Após toda a revisão terminada foi desenhada parte do telhado do edifício, para um desenho mais completo. Esse desenho, contudo, não é exato, mas sim uma representação que teve como base um conjunto de fotografias que não foram consideradas no *PhotoModeler* (Figura 6-9).

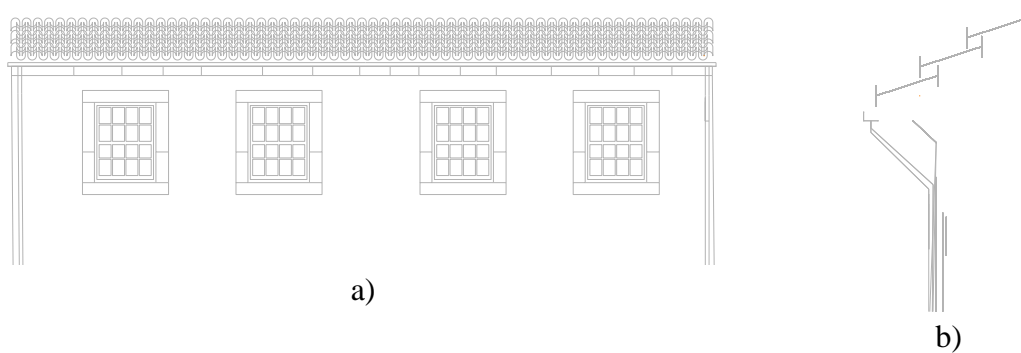


Figura 6-9: Representação de parte do telhado em a) alçado e em b) perfil

### 6.1.2 Resultados finais

A Figura 6-10 apresenta o modelo em estrutura de arame. Os desenhos das portas e janelas não foram desenhados na totalidade no *PhotoModeler*, tendo sido finalizados em *AutoCAD*.

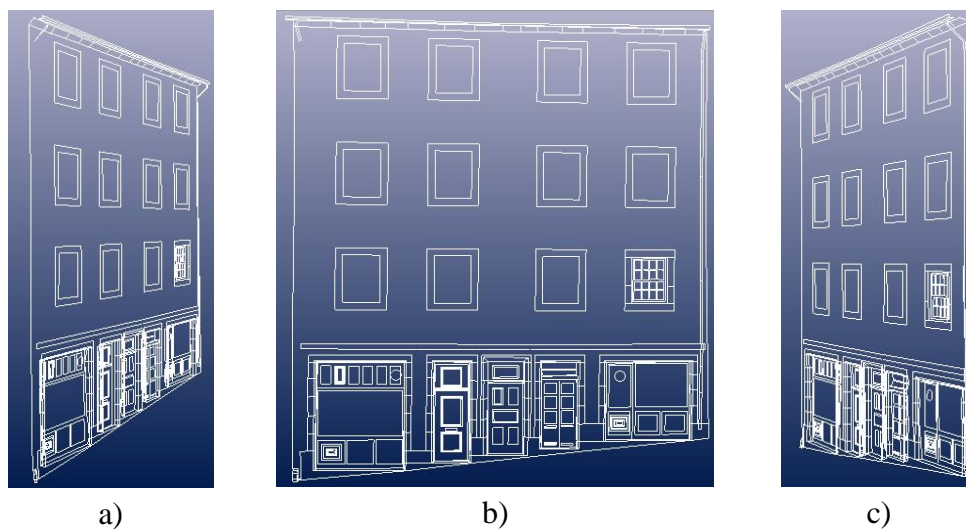


Figura 6-10: Modelo da fachada em estrutura de arame: a) vista em perspectiva do lado esquerdo, b) vista em alçado e c) vista em perspectiva do lado direito

O modelo texturizado final apresenta-se na Figura 6-11.



Figura 6-11: Modelo da fachada texturizado

Na Figura 6-12 encontra-se a fachada revista final e as cotagens da sua altura, largura e desnível.

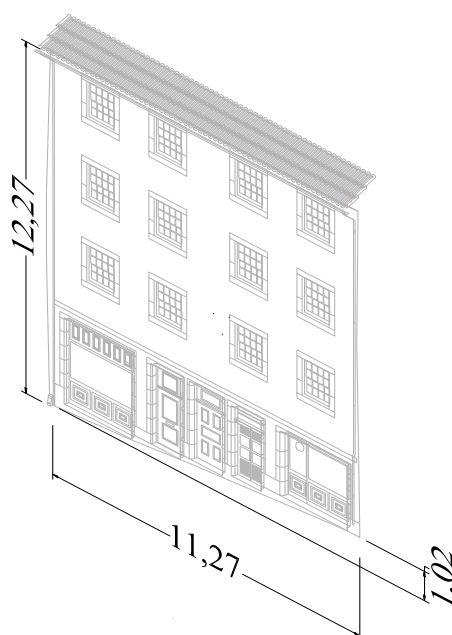


Figura 6-12: Modelo da fachada revisto com algumas cotagens, em metros

A Figura 6-13 apresenta as cotagens em *AutoCAD* dos mesmos elementos medidos pelo método tradicional.

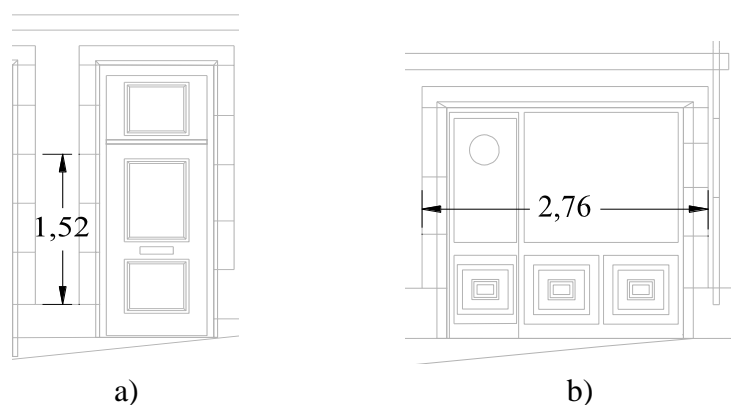


Figura 6-13: Medidas obtidas, em metros, com levantamento fotogramétrico: a) altura entre juntas de ombreira e b) largura de porta

Tendo em conta que com fita métrica se obtiveram os valores 1,53 m e 2,77 m da altura entre juntas de ombreira e de largura de porta, respetivamente, verificou-se que os valores obtidos pelo levantamento fotogramétrico foram bastante próximos.

## 6.2 Monumento histórico

O monumento escolhido para o levantamento foi a Porta do Soar (também conhecida por Porta de São Francisco ou, ainda, Arco dos Melos), localizada na Rua Nunes de Carvalho e construída em 1472 (Património Cultural, 2016). A Porta do Soar e a Porta dos Cavaleiros são as únicas das sete antigas portas da cidade que não foram demolidas.

Para distinguir os dois lados da porta, serão os mesmos designados por lado da Rua Nunes Carvalho e lado do Largo Pintor Gata. A sua arquitetura é do estilo gótico, sendo o arco do lado da Rua Nunes Carvalho tipo ogival (Figura 6-14 a)) enquanto o arco do lado do Largo Pintor Gata é do tipo abaulado (Figura 6-14 b)).



a)



b)

Figura 6-14: Porta do Soar: a) lado da Rua Nunes Carvalho e b) lado do Largo Pintor Gata

## 6.2.1 Levantamento fotogramétrico

### 6.2.1.1 Trabalho em fase de campo

Foi tirado um conjunto de 39 fotos bem sobrepostas.

Para o levantamento do monumento não foram registados pontos de controlo, tendo apenas sido utilizada uma medida tirada com fita métrica para escala (Figura 6-15 a)). Para comparação de resultados, foram também tiradas medidas de uma das pedras (Figura 6-15 b)).



Figura 6-15: Medidas obtidas, em metros, com fita métrica: a) largura do arco para escala e b) medidas de uma das pedras do lado da Rua Nunes Carvalho para comparação com método fotogramétrico

### 6.2.1.2 Trabalho em fase de gabinete

Foram escolhidas 9 fotografias que verificassem a condição de sobreposição e que tivessem melhor qualidade de visualização.

Numa primeira aproximação foi efetuada a picagem e ajustamento de pontos gerais (Figura 6-16) de modo a que o resíduo máximo se traduzisse num valor inferior a 10 píxeis. Em seguida foram desenhados os arcos e picados os restantes pontos para o traçado das juntas.



Figura 6-16: Picagem dos pontos gerais no lado da Rua Nunes de Carvalho

Foi utilizada a ferramenta de desenho de curvas do *PhotoModeler* para o desenho do arco do nicho onde se encontra a figura de São Francisco de Bórgia. Para o seu traçado foram picados 6 pontos que descrevem a trajetória do arco (Córdoba, 2012), demonstrado na Figura 6-17.

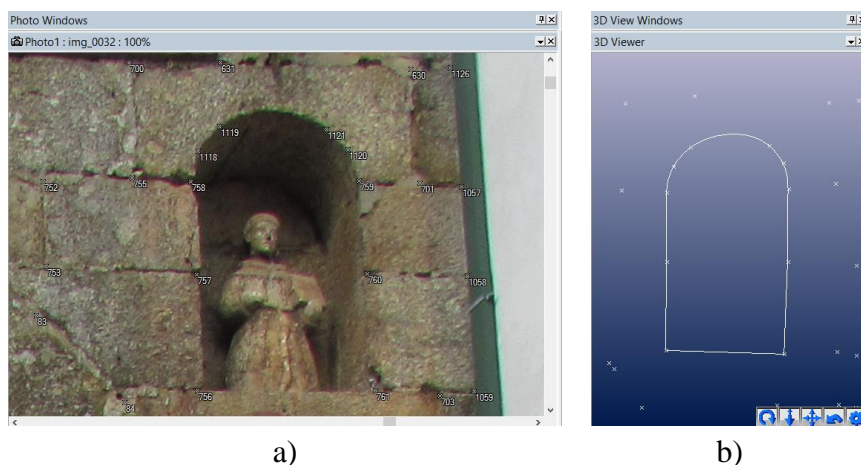


Figura 6-17: Traçado do nicho onde se localiza a figura de São Francisco de Bórgia: a) picagem dos pontos e b) resultado em estrutura de arame

Os arcos de ambos os lados do monumento, assim como o interior, foram desenhados pela união dos pontos marcados nos arcos no *PhotoModeler*.

Após o desenho do arco do lado da Rua Nunes Carvalho, desenharam-se as juntas. À exceção das juntas da zona do arco, que já tinham os pontos marcados, marcaram-se os pontos por aproximação, como mencionado.

Terminado o lado da Rua Nunes de Carvalho, prosseguiu-se para a parte interior da Porta do Soar e para o lado do Largo Pintor Gata, com a mesma metodologia de picagem de pontos gerais e restantes pontos das juntas por aproximação.

O nicho de Santo António, por não ser relevante, não foi desenhado na sua totalidade (Figura 6-18).

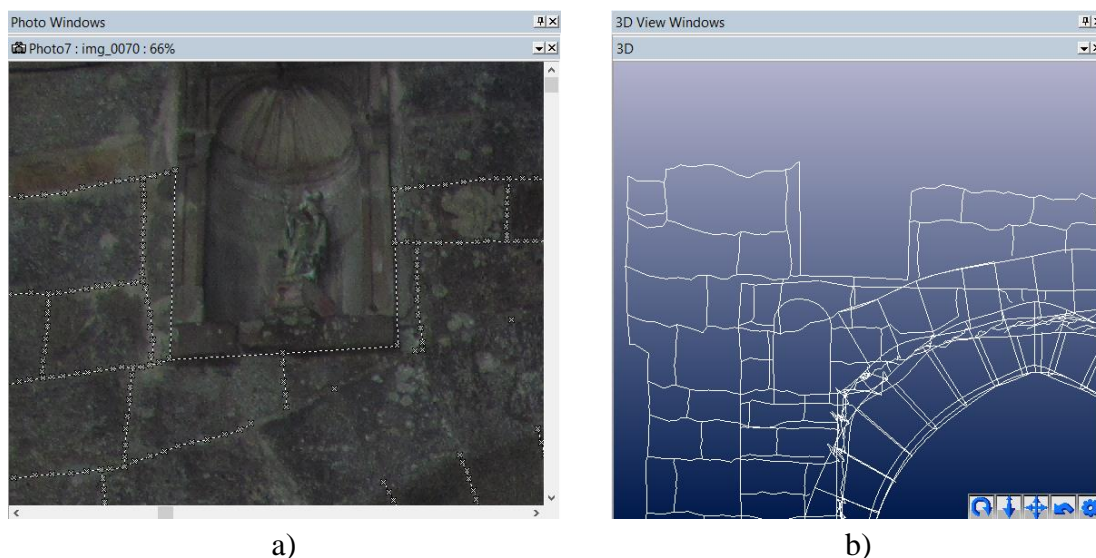


Figura 6-18: Traçado incompleto do nicho onde se encontra a figura de Santo António: a) picagem dos pontos e b) estrutura de arame

No final, foram fechadas as aduelas do arco do lado da Rua Nunes Carvalho (Figura 6-19) unindo os pontos existentes e conhecidos.

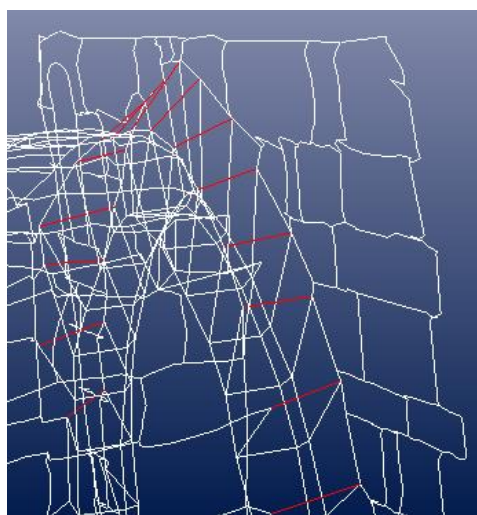


Figura 6-19: Aduelas fechadas, com linhas adicionadas realçadas a vermelho

### 6.2.2 Resultados finais

O modelo em estrutura de arame, visto de várias perspectivas, apresenta-se na Figura 6-20 e Figura 6-21.

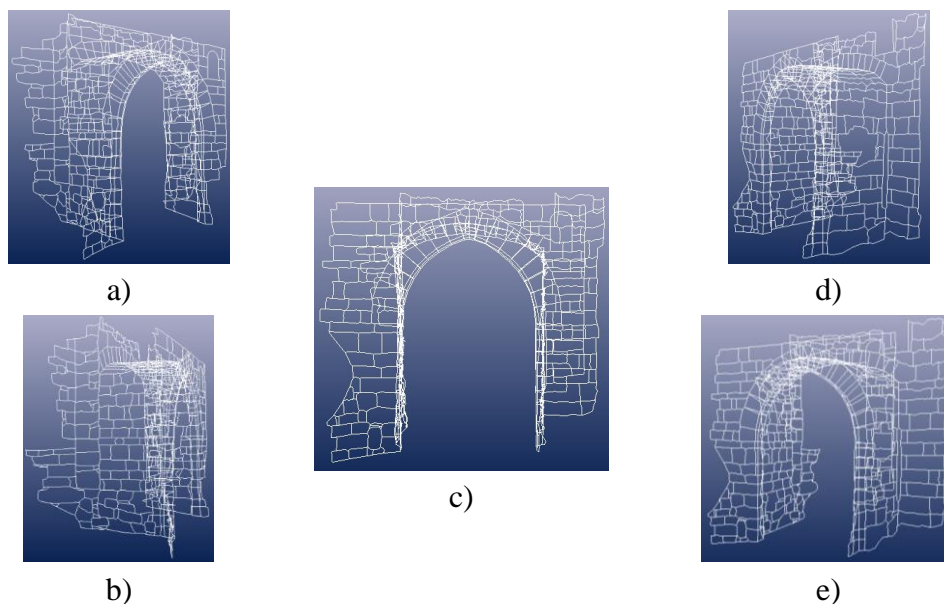


Figura 6-20: Modelo do monumento em estrutura de arame visto do lado da Rua Nunes Carvalho: a) vista em perspectiva do lado esquerdo 1, b) vista em perspectiva do lado esquerdo 2, c) vista frontal, d) vista em perspectiva do lado direito 1 e e) vista em perspectiva do lado direito 2

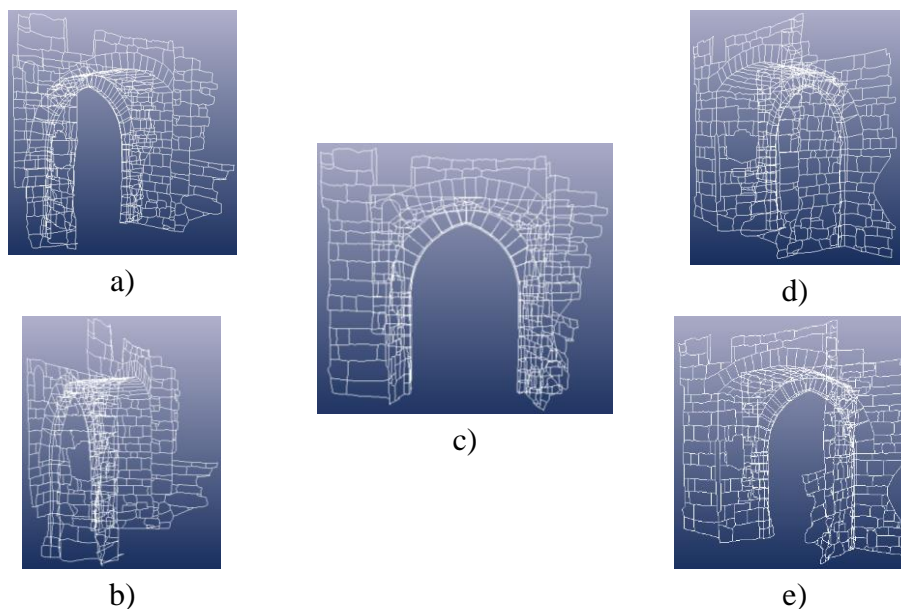


Figura 6-21: Modelo do monumento em estrutura de arame visto do lado do Largo Pintor Gata: a) vista em perspectiva do lado esquerdo 1, b) vista em perspectiva do lado esquerdo 2, c) vista frontal, d) vista em perspectiva do lado direito 1 e e) vista em perspectiva do lado direito 2

A Figura 6-22 e a Figura 6-23 apresentam o modelo final texturizado após a correção dos erros resultantes da escolha automática das fotografias pelo módulo de texturização automática, tendo sido eliminadas as áreas que não foi possível corrigir.

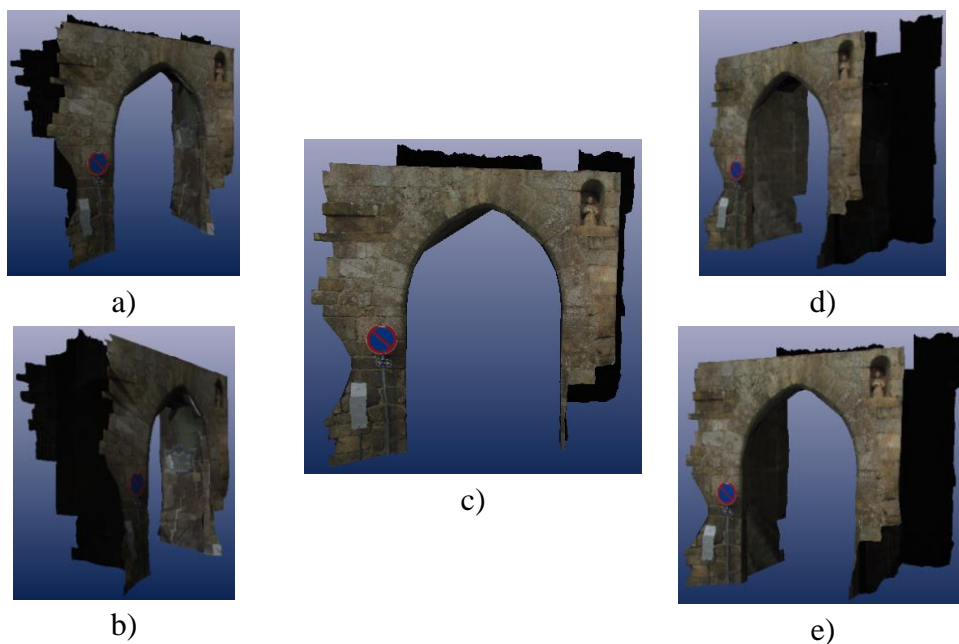


Figura 6-22: Modelo do monumento texturizado visto do lado da Rua Nunes Carvalho: a) vista em perspectiva do lado esquerdo 1, b) vista em perspectiva do lado esquerdo 2, c) vista frontal, d) vista em perspectiva do lado direito 1 e e) vista em perspectiva do lado direito 2

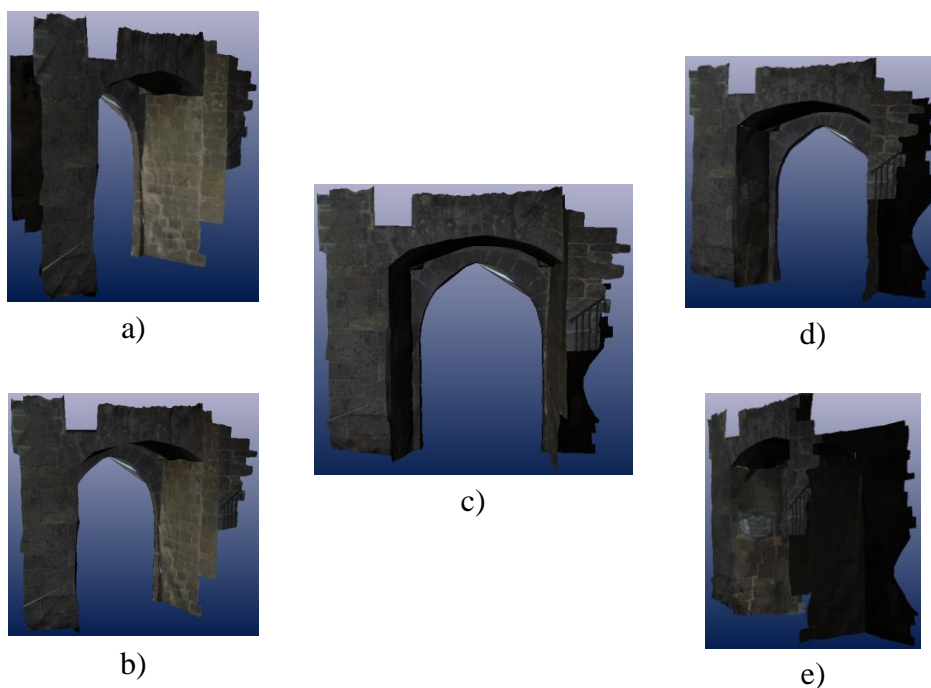


Figura 6-23: Modelo do monumento texturizado visto do lado do Largo Pintor Gata: vista em perspectiva do lado esquerdo 1, b) vista em perspectiva do lado esquerdo 2, c) vista frontal, d) vista em perspectiva do lado direito 1 e e) vista em perspectiva do lado direito 2

O modelo final revisto em *AutoCAD* apresenta-se na Figura 6-24 e Figura 6-25.

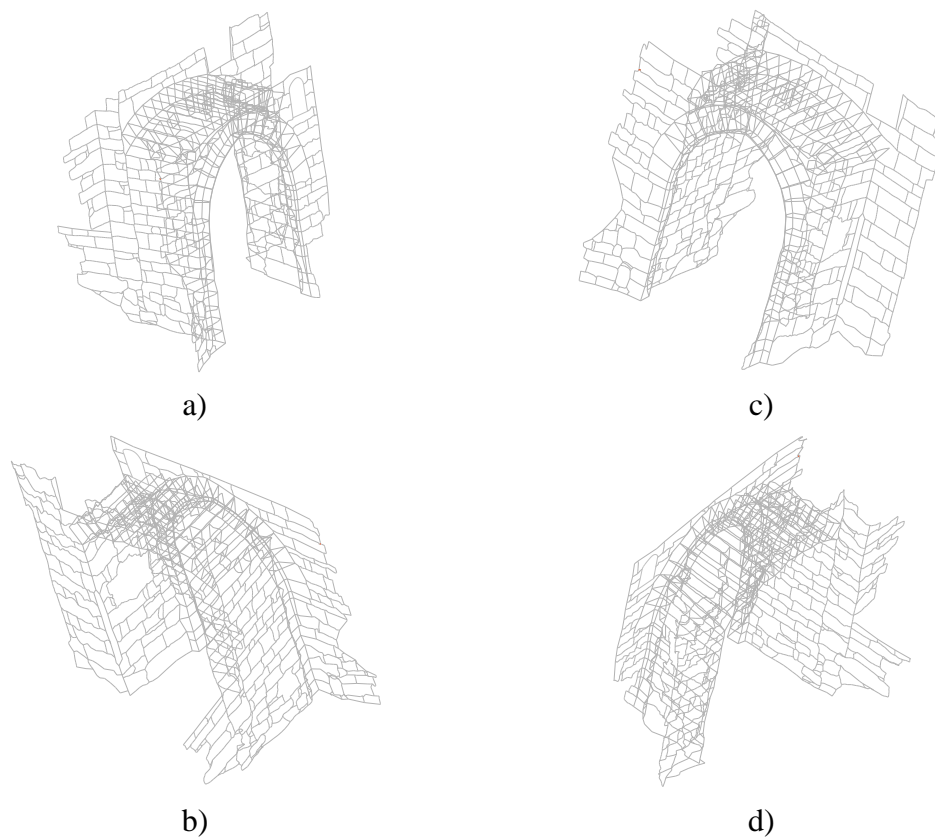


Figura 6-24: Modelo do monumento corrigido em *AutoCAD* completo: a) vista em perspectiva do lado esquerdo do lado da Rua Nunes Carvalho, b) vista em perspectiva do lado direito do lado do Largo Pintor Gata, c) vista em perspectiva do lado direito do lado da Rua Nunes Carvalho e d) vista em perspectiva do lado esquerdo do lado do Largo Pintor Gata

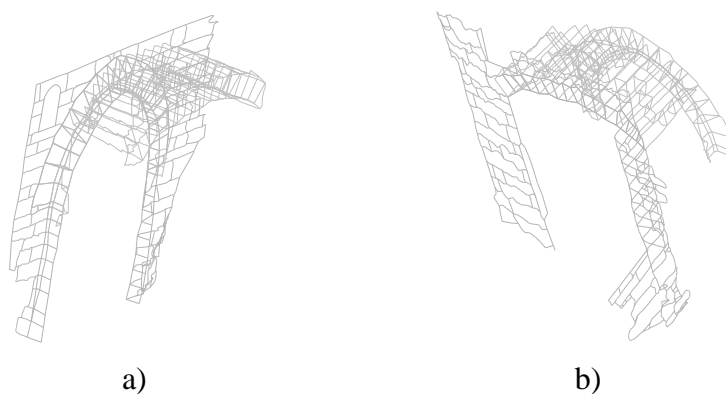


Figura 6-25: Modelo do monumento revisto: a) abóbada com envoltivo do lado da Rua Nunes Carvalho e b) com envoltivo do lado do Largo Pintor Gata

A Figura 6-26 apresenta as cotagens da pedra cujas medidas tinham o objetivo de comparação com o método tradicional, tendo mostrado valores muito próximos.

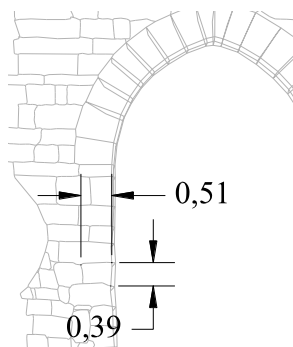


Figura 6-26: Medidas comparativas obtidas, em metros, pelo levantamento fotogramétrico

### 6.3 Observações finais

A aplicação dos conhecimentos adquiridos no estudo-piloto permitiu agilizar o processo de levantamento da fachada e do monumento. Os resultados finais corresponderam ao esperado, sendo possível utilizar os desenhos obtidos para efetuar medições com rigor, na ordem do cm, em comparação com medidas efetuadas pelo método tradicional. No Quadro 6-1 encontram-se as comparações entre os valores obtidos pelos dois métodos de medição, onde se verifica que a maior diferença é de 1 cm.

Quadro 6-1: Comparação de valores das medidas obtidas pelo método tradicional e pelo método fotogramétrico

Projeto	Elemento medido	Método tradicional [m]	Método fotogramétrico [m]
Fachada	Altura entre juntas	1,52	1,53
	Largura de porta	2,76	2,77
Monumento	Altura de pedra	0,39	0,40
	Largura de pedra	0,51	0,51

Embora possa não ser perceptível na fase de campo, deve-se ter o cuidado de serem tiradas fotografias com boas condições de iluminação para evitar a criação de zonas excessivamente iluminadas ou sombreadas.

Observou-se, mais uma vez, a importância de um registo fotográfico completo dos pormenores dos elementos a levantar, de modo a poupar tempo na fase de gabinete, como por exemplo, nas zonas de profundidade das portas da fachada.

Na fase de gabinete do levantamento da fachada, não foi feita uma análise das fotografias a utilizar e verificou-se como essa análise é importante. Devem ser utilizadas fotografias com boa sobreposição e com todos os detalhes registados, mas apenas as suficientes, pois o seu excesso acaba por se traduzir num desperdício de tempo.



## **7. Conclusões**

### **7.1 Considerações finais**

Os objetivos do trabalho, que consistiam no levantamento fotogramétrico simplesmente com recurso a uma câmara não-métrica e a um programa informático e na criação de bases da técnica, acabaram por ser cumpridos. No entanto, poderiam ter sido obtidos melhores resultados com a utilização de uma câmara com melhor resolução e de um tripé com níveis, que permitissem tirar fotografias com ângulos nulos.

Durante o trabalho foi possível observar que a mudança de apenas um píxel na picagem de um ponto pode alterar significativamente o resíduo desse ponto. Assim, para facilitar na marcação de pontos homólogos, recomenda-se a utilização de marcas fiduciais em levantamentos futuros. Em questões de alturas elevadas, a fotogrametria está em vantagem relativamente ao levantamento tradicional que poderia ter risco de queda.

Ao utilizar um programa informático, recomenda-se também que sejam tiradas, sempre que possível, fotografias nas esquinas (a 45° à fachada), mesmo que o estudo seja apenas da fachada, de modo a que sejam fornecidas informações ao programa com pontos de vista diferentes.

## 7.2 Desenvolvimentos futuros

Sendo a fotogrametria uma técnica útil mas pouco conhecida, sugerem-se os seguintes trabalhos, para uma melhor divulgação da técnica:

- Desenvolver um programa informático específico para resolver os cálculos da resseção espacial, por exemplo, com base no programa *E-foto*;
- Aproveitar o levantamento da Porta do Soar para realizar um estudo da deformação da abóbada;
- Uma vez que no DEC são realizados diversos trabalhos do comportamento de paredes de tabique, seria interessante aplicar a fotogrametria para obter as características das paredes, como as distâncias entre ripas e tábuas verticais, em vez de serem medidas manualmente;
- Realizar um levantamento com uma câmara métrica e um tripé com níveis e comparar os resultados com os obtidos no levantamento com a câmara e tripé do DEC;
- Fazer uma comparação de programas informáticos de fotogrametria, por exemplo, comparar resultados obtidos pelo *PhotoModeler* e pelo *E-foto*.

## REFERÊNCIAS

Aerosat. (2015). *Restituição aerofotogramétrica digital e Geração de Ortofotocartas*. Recuperado em 01 abril, 2015 de <http://www.aerosat.com.br/restituicao.html>.

Ahmed, M. F. M., & Haas, C. T. (2010). *The potential of low cost close range photogrammetry towards unified automatic pavement distress surveying*. In Proceedings of The 89th Annual Meeting Of The Transportation Research Board (DVD), Washington, DC (pp. 11-15).

Albertz, J. (2002). *Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage*. Potsdam: International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(5/C7), 19-25.

Albertz, J., Attwenger, M., Barrett, J., Casley, S., Dorninger, P., Dorrer, E., & Heipke, C. (2005). *HRSC on Mars Express—Photogrammetric and cartographic research*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(10), 1153-1166.

Altrock, P. V. (2004). *Aplicações da fotogrametria arquitetural digital na documentação de edificações históricas: estudo das obras do Brigadeiro Joseph da Silva Paes, séc. XVIII* (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina.

Álvares, P. M. F. (2009). *Fotogrametria digital e risco de incêndio em sítios históricos: Possibilidades de aplicação* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto.

Antman, M. (2007). *The Autochrome: 100 Years of Color Photography*. Reprinted from: *The Picture Professional*, Issue 2.

Brandalize, M.C.B. (2004). *Topografia – Apostila*. Recuperado em 11 maio, 2015 de <http://www2.uefs.br/geotec/topografia/apostilas/topografia%2815%29.htm>.

Britannica. (2015). *Eastman Kodak Company*. Recuperado em 23 abril, 2015 de <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/177448/Eastman-Kodak-Company>.

Brito, J. N., & Coelho, L. (2007). *Fotogrametria digital*. Rio de Janeiro: Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Busselle, M. (1979). *Tudo sobre fotografia*. São Paulo: Book RJ Gráfica e Editora.

Campanholi, J. A. (2014). *Fotografia e educação: o uso da fotografia na prática docente*. *Revista Primus Vitam* N<sup>o</sup>, 7(2<sup>o</sup>).

## REFERÊNCIAS

CCM. (2015). *Distância focal*. Recuperado em 04 junho, 2015 de <http://pt.kioskea.net/faq/9345-a-distancia-focal>.

Centro de Informação Geoespacial do Exército. (2013). *O Início da Cartografia em Portugal*. Recuperado em 12 maio, 2015 de <http://www.igeoe.pt/index.php?id=29>.

Coelho, A. H. (2000). *Fotogrametria Digital à Curta Distância aplicada a medição da configuração geométrica de elementos de instalações industriais* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.

Conrod, A. C. (1963). *Position Indication at Sea by Astro-Photogrammetry* (No. RE-5). Massachusetts: Institute of Technology, Cambridge, Experimental Astronomy Laboratory.

Córdoba, P. A. F. (2012). *Levantamento fotogramétrico de monumentos arquitetônicos para projetos de restauração – Estudo de caso: Palácio Itamaraty–Brasília, DF* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

Da Silva, B. Q., Mamede, C. G., Silva, M. V., & Schuler, D. C. A. B. (2012). *Planejamento para o recobrimento fotogramétrico da fachada principal da Basílica de nossa Senhora do Carmo em Recife–PE, Brasil*. Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Derenyi, E. E. (1996). *Photogrammetry: the concepts*. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.

Dos Santos, D. R. (2013). *Fotogrametria I (1ª Edição)*. Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná.

Filho, E. D., & Ruggiero, J. R. (S.d). *Lentes*. São Paulo: Universidade Estadual Paulista. Projeto Pró-Ciência

Fraga, C. A. J. V. O., & Zingano, E. M. (2015). *Fotografia: linguagem visual*. *Maiêutica-Curso de Artes Visuais*, 3(1).

Fragoso, S. (2004). *Calidoscopia Midiática: da criação à ressignificação das imagens em perspectiva*. *Intexto*, (11), 1-13.

Ghosh, S. K. (2005). *Fundamentals of computational photogrammetry*. New Delhi: Concept Publishing Company.

GIMP. Disponível em <https://www.gimp.org/>.

## REFERÊNCIAS

- Gomes, J. C. O. (2013). *Análise de vigas de betão sujeitas à flexão através de Fotogrametria* (Dissertação de Mestrado). Insitudo Superior de Engenharia de Coimbra.
- Gonçalves, G. R. (2005). *Elementos de fotogrametria analítica*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Elementos de aula de Fotogrametria Digital.
- Groetelaars, N. (2004). *Um estudo da Fotogrametria Digital na documentação de formas arquitetônicas e urbanas* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal da Bahia.
- Grussenmeyer, P., & Khalil, O. A. (2002). *Solutions for exterior orientation in photogrammetry, a review*. The photogrammetric record, an international journal of photogrammetry, 17 (100), pp. 615-634. <hal-00276983>.
- ISO. (2015). *ISO 12232:2006*. Recuperado em 14 junho, 2016 de [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=37777](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=37777)
- Kennie, T. J., & Petrie, G. (2010). *Engineering surveying technology*. CRC Press.
- Kodak. (2015). *História da fotografia*. Recuperado em 16 abril, 2015 de [http://wwwbr.kodak.com/BR/pt/consumer/fotografia\\_digital\\_classica/para\\_uma\\_boa\\_foto/historia\\_fotografia/historia\\_da\\_fotografia02.shtml?primeiro=1](http://wwwbr.kodak.com/BR/pt/consumer/fotografia_digital_classica/para_uma_boa_foto/historia_fotografia/historia_da_fotografia02.shtml?primeiro=1).
- Kucukkaya, A. G. (2004). *Photogrammetry and remote sensing in archeology*. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 88(1), 83-88.
- Luhmann, T. (2004). *A historical review on panorama photogrammetry*. In Proceedings of panoramic Photogrammetry workshop. Dresden, Germany.
- Manual do *PhotoModeler*. (2015). Recuperado de <http://www.photomodeler.com>.
- Mateus, L. M. C. (2010a). *Fotogrametria e Varrimento Laser 3D: Princípios e aplicações em Conservação da Arquitectura*. Universidade Técnica de Lisboa. Seminário de apoio ao Projecto Final de Mestrado.
- Mateus, L. M. C. (2010b). *Processos de Computação – Rectificação de imagens*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Mitchell, H. L. (1995). *Applications of digital photogrammetry to medical investigations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 50(3), 27-36.
- Os primos. (2015). *Caça ao Tesouro - Nível I: Os Daguerreótipos*. Recuperado em 22 abril, 2015 de [http://www.osprimos.com/Frame%209%20O%20Simbolo%20da%20Profecia%20Maia/pag\\_5\\_Caca\\_ao\\_Tesouro\\_NivelI.htm](http://www.osprimos.com/Frame%209%20O%20Simbolo%20da%20Profecia%20Maia/pag_5_Caca_ao_Tesouro_NivelI.htm).

## REFERÊNCIAS

Paranhos, F. (2014). *Como funciona uma câmera fotográfica analógica*. Recuperado em 20 abril, 2015 de <http://www.oficinadanet.com.br/post/12121-como-funciona-uma-camera-fotografica-analogica>.

Património Cultural. (2016). *Muralhas e Portas Antigas da Cidade*. Recuperado em 28 junho, 2016 de <http://www.patrimoniocultural.pt/pt/patrimonio/patrimonio-imovel/pesquisa-do-patrimonio/classificado-ou-em-vias-de-classificacao/geral/view/70675/>.

Pelosi, G. (2008). *James Clerk Maxwell: his journey to Italy; and the first color photograph*. Antennas and Propagation Magazine, IEEE, 50(1), 240-243.

Pereira, P. V. (2005). *Qualidade e gestão da informação geográfica na actividade de um município* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Lisboa.

Prins, A., & Adams, M. J. (2012). *Practical Uses for Photogrammetry on Archaeological Excavations*. Jezreel Valley Regional Project: JVRP White Papers in Archaeological Technology. Recuperado 28 junho, 2015 de [www.jezreelvalleyregionalproject.com/practical-uses-for-photogrammetry-on-archaeological-excavations](http://www.jezreelvalleyregionalproject.com/practical-uses-for-photogrammetry-on-archaeological-excavations).

Railano. (2014). *Aula de fotogrametria*. Recuperado em 30 junho, 2016 de <http://pt.slideshare.net/railano/aula06-geo-pgfotogrametria>.

Rami, A. R. (2012). *Photogrammetry for Archaeological Documentation and Cultural Heritage Conservation*. INTECH Open Access Publisher.

Redweik, P. (2007). *Fotogrametria aérea*. Universidade de Lisboa.

Rezende, W. S. (2009). *Fotogrametria digital e patrimônio histórico: uma proposta metodológica*. Belo Horizonte: Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, 2(1).

Ribeiro, J. C. (2002). *Fotogrametria Digital*. Universidade Federal de Viçosa.

Rozenblyum, N. D. (1959). *The Use of the Photogrammetric Method In Determining the Spatial Coordinates of Points On a Meteor Trajectory*. Soviet Astronomy, 3, 974.

Sampaio, E. P. M. (2007). *Noções básicas de detecção remota, fotogrametria e foto-interpretção em pedologia*. Universidade de Évora.

Santos, Z. M. S. P. (2003). *Elaboração de um arquivo arquitectónico inserido num modelo tridimensional urbano* (Dissertação de Mestrado). Universidade do Porto.

## REFERÊNCIAS

Silva, A. M. D. (2014). *A representação das matrizes de rotações com o uso dos quatérnios: aplicações à fotogrametria* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco..

Silva, D. C. M. (2016). *Câmara escura de orifício*. Brasil Escola. Recuperado em 25 janeiro, 2016 de <http://brasilecola.uol.com.br/fisica/camara-escura-orificio.htm>.

Silvestro, M. A. (2009). *O papel da foto na hipermídia* (Dissertação de Mestrado). Pontifícia Universidade Católica de São Paulo.

Sougez, M. L. (2001). *História da Fotografia*. Lisboa: DINALIVRO.

Snyder, L. J. (2015). *Eye of the Beholder: Johannes Vermeer, Antoni Van Leeuwenhoek, and the Reinvention of Seeing*. Head of Zeus.

Tokarczyk, R., & Mikrut, S. (2000). *Close range photogrammetry system for medicine and railways*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 5.

Universidade Católica Portuguesa, Porto. (2015). Recuperado em 30 abril, 2015 de <http://www.porto.ucp.pt/nonio/nonio/Historia/1656.html>.

Utterback, J. M. (1995). *Developing technologies: The Eastman*. *The McKinsey Quarterly*, 1, 131-144.

Valença, J., Júlio, E. N. B. S., & Araújo, H. (2006). *Aplicações de fotogrametria em engenharia civil*. Patorreb2006–2.º Encontro sobre patologias e Reabilitação de Edifícios, 20, 803-810.

Wang, Y. (1992). *A rigorous photogrammetric adjustment algorithm based on co-angularity condition*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29(B5), 195-202.

Wayne, R. O. (2013). *Light and video microscopy*. Academic Press.

Wegener, A., & Laser-Junga, H. (2009). *Photography of the anterior eye segment according to Scheimpflug's principle: options and limitations – a review*. *Clinical & Experimental Ophthalmology*, 37(1), 144-154.

Yanaga, S. S. (2006). *Fotogrametria digital à curta distância na documentação do patrimônio arquitetônico: estudo de caso* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.

Yoo, Y., Lyytinen, K., Thummadi, V., & Weiss, A. (2010). *Unbounded innovation with digitalization: A case of digital camera*. In Annual Meeting of the Academy of Management.

## REFERÊNCIAS

## APÊNDICE A- Retificação de imagem pelo *AutoCAD* e *GIMP*

No presente apêndice aplicou-se um método de retificação de imagem a uma fotografia de fachada completa (Figura A - 1), descrito por Mateus (2010b) para o qual desenvolveu uma aplicação em *AutoCAD* de retificação de imagens.



Figura A - 1: Fotografia a ser retificada

Inicialmente, a imagem foi aberta no *GIMP* para registo de valores do tamanho da tela e da resolução em píxeis e em centímetros que seriam necessários para dimensionar a mesma em *AutoCAD*.

Em *AutoCAD*, foram desenhados o contorno da imagem e linhas de referência de medidas conhecidas (Figura A - 2). No caso da imagem em estudo, eram conhecidas a largura e altura da fachada, tendo sido desenhado o seu contorno.



Figura A - 2: Linhas dos contornos da imagem e da fachada, a laranja e a verde respetivamente

## APÊNDICE A

À parte, desenhou-se uma figura correspondente ao contorno da fachada, com as medidas reais, à escala apropriada. Com a aplicação *rectificador.LSP* fez-se a correspondência das linhas a verde às linhas de medidas reais. Após solicitação da aplicação, foram seleccionadas as linhas do contorno da imagem, ou seja, as linhas a laranja, para que fossem adaptadas ao contorno da fachada. Na Figura A - 3 apresentam-se as linhas do contorno da fachada com medidas reais a azul e as linhas de contorno a amarelo.

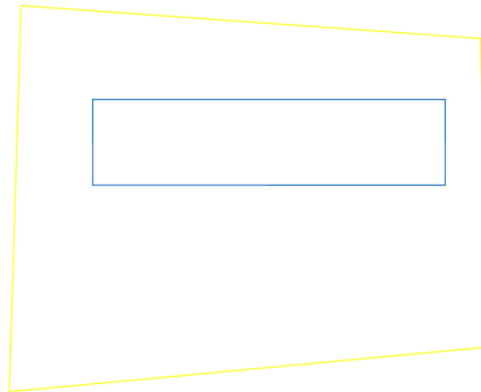


Figura A - 3: Linhas desenhadas retificadas

A imagem da Figura A - 3 foi convertida em PDF e novamente aberta no *GIMP*, onde se moldou a imagem original da Figura A - 1 à imagem retificada da Figura A - 3. A Figura A - 4 é o resultado final da retificação.



Figura A - 4: Imagem retificada final

No final, experimentou-se inserir a imagem retificada no *AutoCAD*, escalando-a a partir das medidas da altura e largura da fachada com o objetivo de tirar as medidas da porta (Figura A - 5).

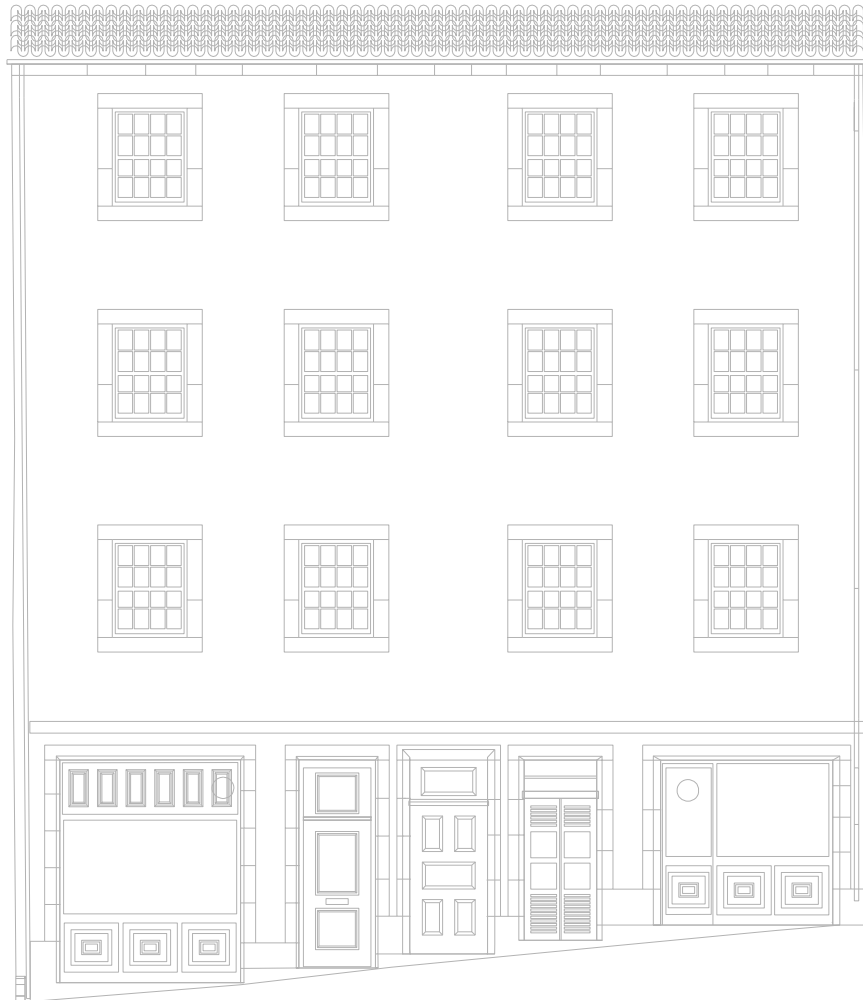
## APÊNDICE A



Figura A - 5: Imagem escalada com porta cotada, em metros

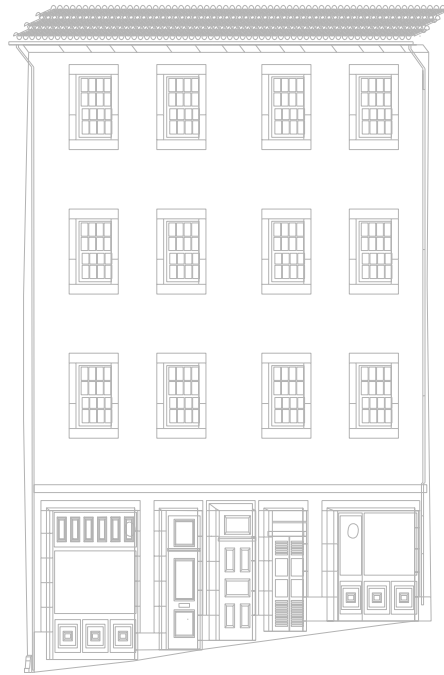
## APÊNDICE A

**APÊNDICE B – Desenhos revistos resultantes do levantamento da fachada**



Escala 1:100

Figura B - 1: Alçado de fachada



Escala: 1:150

Figura B - 2: Vista em perspectiva do lado direito da fachada



Escala 1:50

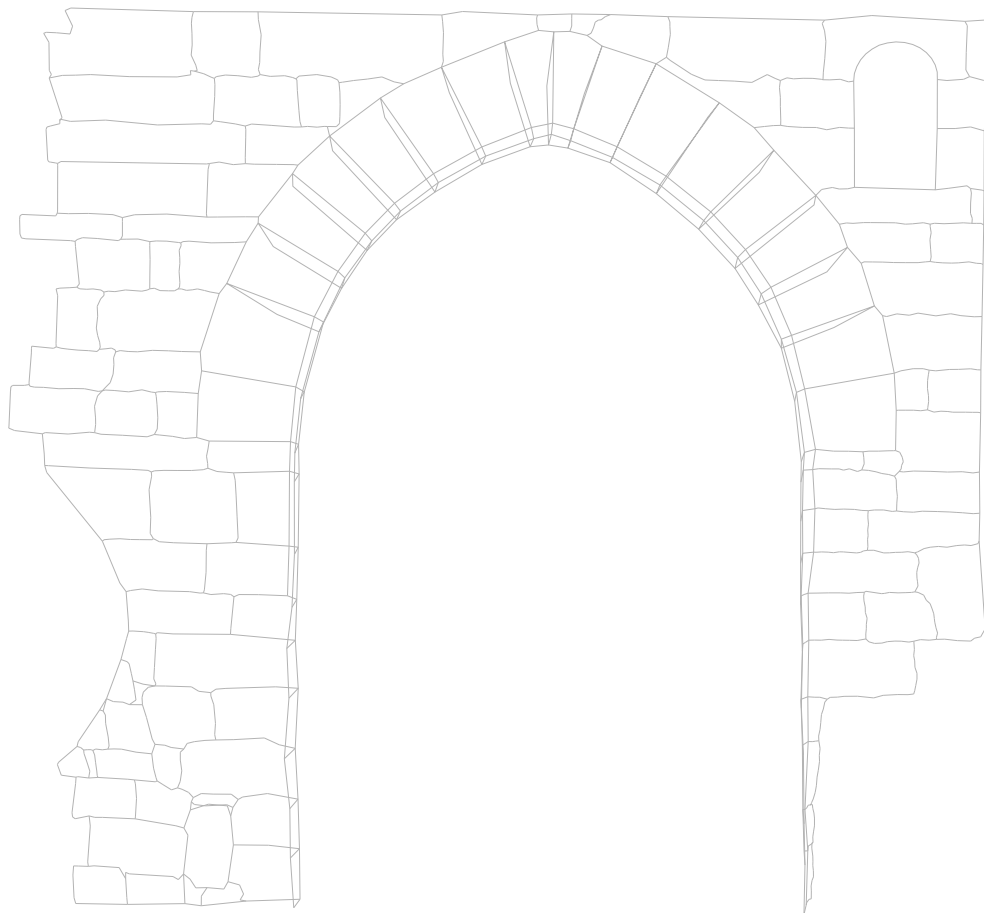
Figura B - 3: Vista pormenorizada das portas



Figura B - 4: Fachada com texturas aplicadas

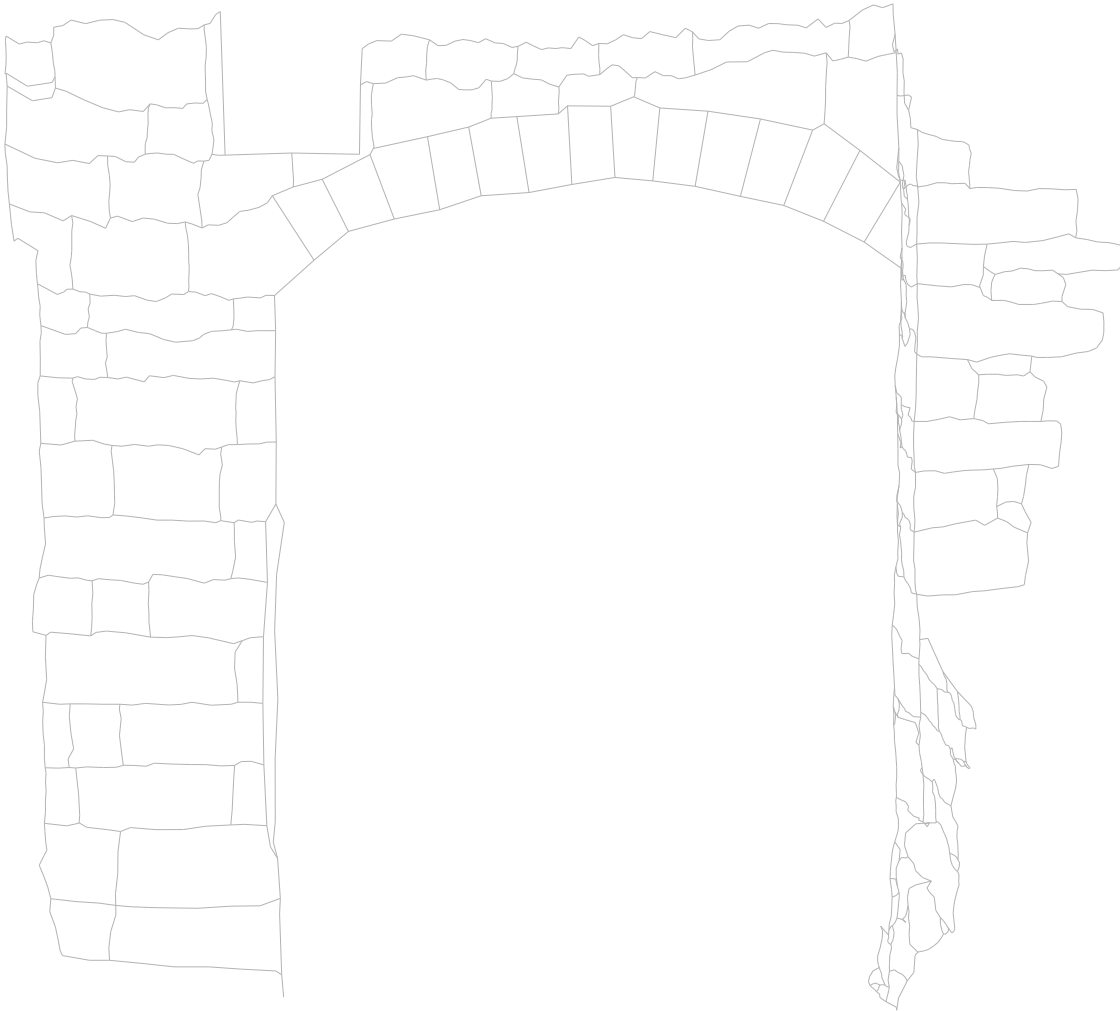
## APÊNDICE B

**APÊNDICE C – Desenhos revistos resultantes do levantamento do monumento**



Escala: 1:50

Figura C - 1: Alçado de monumento (lado de Rua Nunes Carvalho)



Escala: 1:50

Figura C - 2: Alçado de monumento (lado de Largo Pintor Gata)

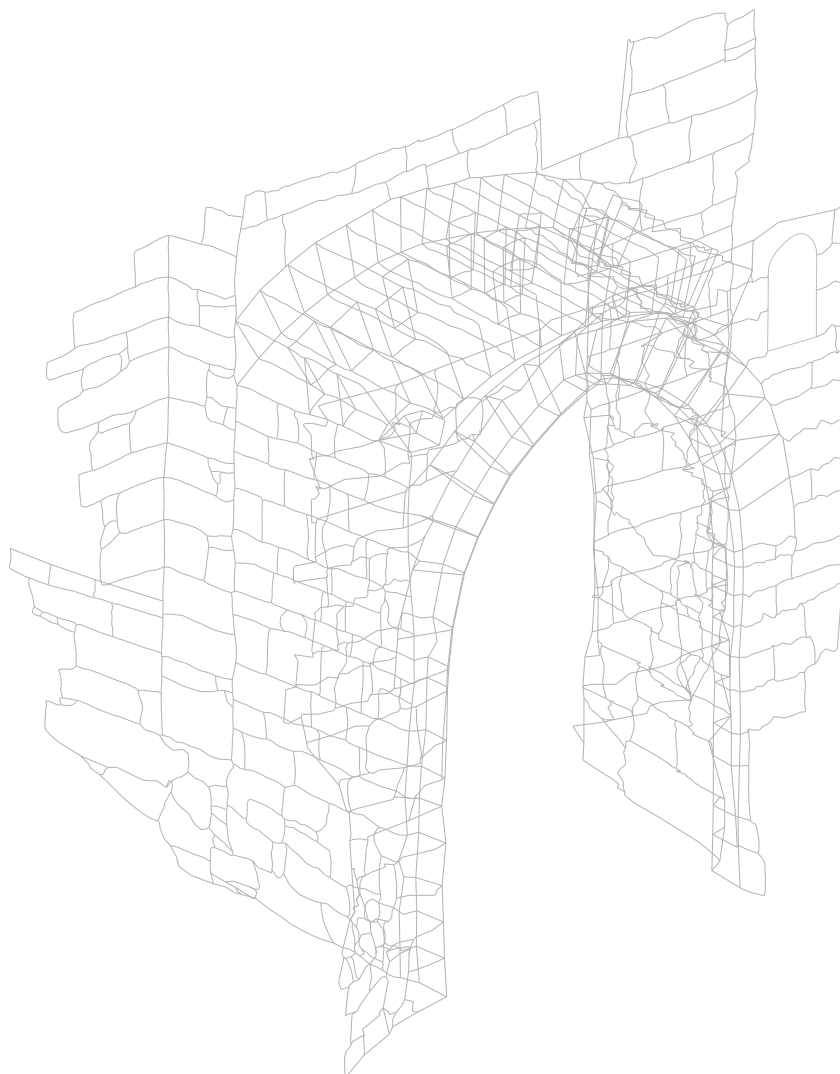


Figura C - 3: Vista completa, com arco fechado



Figura C - 4: Porta do Soar com texturas (lado da Rua Nunes Carvalho)



Figura C - 5: Porta do Soar com texturas (lado do Largo Pintor Gata)