Zulmira Maria Santos Pereira Santos

Elaboração de um Arquivo Arquitectónico Inserido num Modelo Tridimensional Urbano



FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Setembro de 2003

Zulmira Maria Santos Pereira Santos

Elaboração de um Arquivo Arquitectónico inserido num Modelo Tridimensional Urbano



Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
Setembro, 2003

Zulmira Maria Santos Pereira Santos

Elaboração de um Arquivo Arquitectónico inserido num Modelo Tridimensional Urbano



FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Mestre em Detecção Remota

Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
Setembro, 2003

À minha Mãe de Coração (Avó Quina)...

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho foi possível devido à ajuda de várias pessoas, quer no que respeita à parte da realização do trabalho e escrita da tese, quer a nível pessoal. Assim, deixo o meu sentido agradecimento a todas elas, esperando que, tal como eu, sintam que valeu a pena.

À Doutora Ana Morgado por todo o apoio, disponibilidade e dedicação mostrados na orientação e realização deste trabalho;

Ao Doutor José Alberto Gonçalves pela disponibilidade e interesse;

À Sra. Dona Amélia que disponibilizou a sua experiência de fotogrametrista para a obtenção de alguns dos dados fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Luís Fernandes, ao António Oliveira e ao Pedro Silva pelo apoio na resolução dos problemas surgidos no âmbito dos vários *softwares* utilizados e pela amizade e compreensão;

Ao Mestre Marco Costa por toda a ajuda e disponibilidade prestada no âmbito da estatística para a análise de resultados.

À Topométrica na pessoa do Engenheiro Rui Ferreira pelo empréstimo da estação total laser;

Ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico pelo empréstimo da câmara semi-métrica utilizada;

À Doutora Joana Fernandes pela compreensão demonstrada relativamente aos pedidos de adiamento;

Aos meus pais por todo o carinho e compreensão demonstrados.

À Doutora Luísa Pereira por todo o apoio e amizade o meu mais sincero obrigada.

À Mestre Clara Lázaro pela amizade e carinho demonstrada durante todo este tempo. Foi muito bom fazer "grupo" com ela.

A todos os meus amigos que de alguma forma me incentivaram a prosseguir e sempre se interessaram: Ana Oliveira, Isabel Teixeira, Jaime e Adélia Adelino, Rui Costa e Silva, Judite Martins, Licínia e Rui Ferreira, Dora Moreira, Rui de Castilho e Luísa Magalhães;

Finalmente e, com todo o amor, um agradecimento muito especial ao meu marido José e à minha filha Diana por todo o amor, apoio, compreensão e carinho demonstrados.

RESUMO

O património arquitectónico encontra-se sob crescente possibilidade de destruição, devido ao risco de catástrofes múltiplas causadas por interferência humana ou natural. A importância da criação de arquivos arquitectónicos para a salvaguarda dos monumentos históricos é reconhecida internacionalmente. Para que o registo dos mesmos fique completo é importante também a documentação da sua área envolvente, que no caso de zonas urbanas se traduz na criação de modelos tridimensionais dos edifícios em causa.

Em Portugal existem numerosos edifícios de importância histórica e arquitectónica. Este projecto contemplou como área de estudo duas Igrejas Matriz: a Igreja de S. Sebastião em Ponta Delgada e a Igreja Matriz de Oeiras para a elaboração do arquivo arquitectónico, bem como a área que as rodeia para o modelo 3D urbano, com o objectivo de ajudar a uma melhor caracterização dos monumentos a registar.

Um desafio importante na elaboração de arquivos arquitectónicos é conseguir obter qualidade (precisão) a custos mais baixos, uma vez que os métodos tradicionais de registo do património, incluindo a fotogrametria estereoscópica, requerem instrumentação e *software* dedicados, e portanto, bastante dispendiosos. A diminuição de custos passa pela utilização de metodologias alternativas mantendo sempre um padrão equivalente de precisão. O recurso a estas metodologias em trabalhos científicos permite a sua validação e divulgação, contribuindo para um possível incremento do registo do património.

Este estudo começa por uma compilação dos diversos princípios teóricos, requisitos e metodologias existentes para a execução do arquivo arquitectónico e do modelo tridimensional urbano do meio circundante. Descrevem-se, depois, as várias fases envolvidas no registo fotogramétrico das fachadas das igrejas acima mencionadas, o qual serviu como base de estudo na implementação de diferentes metodologias, nomeadamente a fotogrametria estereoscópica e a fotogrametria monoscópica convergente. Procedeu-se ainda à utilização de diferentes tipos de instrumentação no âmbito da aquisição de dados (câmaras fotográficas) com o fim de comparar o seu desempenho e avaliar a influência na precisão do produto final.

Depois de uma análise estatística dos resultados obtidos pode concluir-se que a precisão obtida usando a metodologia menos dispendiosa e mais versátil – fotogrametria convergente monoscópica com câmaras fotográficas digitais não métricas - se encontra dentro dos requisitos impostos à partida. No entanto, o seu desempenho na restituição de detalhes complexos não é compatível com a precisão obtida, pelo que é necessário recorrer ao método fotogramétrico convencional.

Como elementos do arquivo arquitectónico obtiveram-se, para além das fotografias e pontos de controlo, os alçados das respectivas fachadas, o modelo 3D vectorial pormenorizado da Igreja e o modelo 3D renderizado com fotografias rectificadas, assim como o respectivo modelo tridimensional urbano.

Para apresentação final dos resultados, procedeu-se a uma breve utilização de técnicas multimédia, com o intuito de exemplificar a contribuição desta forma de divulgação, para a valorização do modelo convencional de arquivo arquitectónico.

ABSTRACT

The architectural heritage is under the increasing possibility of destruction due to the risk of multiple catastrophes, caused by human or natural interference. The importance of the photogrammetric archives to preserve the historical monuments is internationally recognised. For completion of the archive it is also important to consider the involving area, representing it by a tridimensional urban model when the monument is surrounded by buildings.

In Portugal there exist numerous buildings of historical and arquitectural importance. This project uses two mother churches as the study area: the Saint Sebastian church in Ponta Delgada and Oeiras mother church.

The best quality at the lowest expenses is a relevant issue when creating the architectural archive. Traditional methods including stereoscopic photogrammetry require expensive specialised equipment and software. The scientific validation and divulgation of alternative methods, maintaining the required precision standards will contribute for the increasing of photogrammetric record of architectural heritage.

This study starts with a compilation of the various theoretical principles and requirements to elaborate a photogrammetric archive inserted into a tridimensional urban model of the surroundings. The various phases involved in the photogrammetric surveying of the facades of the churches above mentioned, are presented and were used as the basis for the implementation of different methodologies, namely the stereoscopic photogrammetry (normal case) and the monoscopic convergent photogrammetry. Distinct types of equipment were used considering data acquisition (photographic cameras) in order to compare their performance and evaluate the influence on the precision of the results.

It was concluded, from a statistical analysis of the results, that the less expensive and more versatile methodology – monoscopic convergent photogrammetry with non-metric cameras – provides the required precision. However, when the architectural features are not regular, this approach presents limitations that have to be solved using the conventional stereoscopic method.

The architectural archive elements obtained include, besides de photographs and control points, the respective drawings of the facades, the detailed 3D vector model of the monument and the rendered 3D model using the rectified photographs, as well as the respective tridimensional urban model.

To present the final results, some multimedia techniques were used, to exemplify how they improve the conventional photogrammetric archive.

RÉSUMÉ

Le patrimoine architectonique se trouve sous croissante possibilité de destruction, du au risque de catastrophes multiples, causées par interférence humaine ou naturelle. L'importance de créer des archives photogrammétriques pour sauvegarder les monuments historiques est reconnue internationalement. Pour que le registre des même reste complet il soit important aussi la documentation dans la zone qui l'entoure, qui dans le cas des zones urbaines se traduit par la création de modèles tridimensionnels des édifices en cause.

Au Portugal il existe de nombreux édifices d'importance historique et architectonique. Ce projet á contemplé comme aire d'étude deux églises paroissiales: L'église de S. Sebastião a Ponta Delgada et l'église paroissiale de Oeiras pour l'élaboration de l'archive architectonique, ainsi que la zone qui l'entoure. Le modèle 3D urbain, a pour objectif d'aider à une meilleure caractérisation des monuments a registré.

Un défi important dans l'élaboration de l'archive architectonique, il faut arriver á obtenir la qualité (précision) á plus bas prix, une fois que les méthodes traditionnelles de registre du patrimoine, inclure la photogrammétrie stéréoscopique, il faut requérir une instrumentation et software dédier, donc, le prit est très élevé. La diminution du prix passe par l'utilisation de méthodes alternatives, gardant toujours la norme équivalent à précision. Le recoure à cette méthode dans les travaux scientifique permet sa validation et divulgation, contribue pour un possible développement du registre du patrimoine.

Cette étude commence par la compilatrice de divers principes théoriques et conditions nécessaires á l'exécution de l'archives photogrammétriques et du modelé tridimensionnel urbain du milieu qui l'entoure. Se présentent, successivement, les différentes phases englobées au registre photogrametrique ci-dessus lequel á servi de base á l'étude d'implantation de différentes méthodologies, nommément la photogrammétrie convergente monoscopique et la photogrammétrie stéréoscopique. On a procédé aussi á l'utilisation de différents types d'instrument dans le cadre de l'acquisition de données (caméras photographiques) avec la finalité de comparer l'opérationnel et l'avaliation de l'influence dans la précision du produit final.

Après une analyse statistique des résultats on peu conclure que la précision obtenue utilisant la méthode la plus économique est la plus versatile – photogrammétrie convergente monoscopique avec des cameras photographiques digitaux non-métriques – se trouve dans les conditions imposées en partis. Ce pendant son accomplissement on certains cas d'architecture n'est compatible avec la précision obtenue, par le qu'il est nécessaire de recourir aux méthodes photogrammétriques conventionnelles.

Comme les éléments de l'archive architectonique on á obtenu, en plus des photographies et points de contrôle, les projections verticales des respectives façades, le modèle 3D vectorielle détaillé de l'église et le modèle 3D couvert avec des photographies rectifiées ainsi comme le respectif modèle traditionnel urbain.

Pour la présentation finale des résultats, on á procédé a une brève utilisation de techniques multimédia, avec l'intuition d'exemplifier la contribution de cette forme de divulgation, pour la valorisation du modèle conventionnel de l'archive photogrammétrique.

ÍNDICE GERAL

DEDICATÓRIA 3
AGRADECIMENTOS 5
RESUMO 7
ABSTRACT 9
RÉSUMÉ 11
ÍNDICE GERAL 13
ÍNDICE DE FIGURAS 17
ÍNDICE DE TABELAS 21
1 INTRODUÇÃO 23
1.1 O arquivo arquitectónico e o modelo tridimensional urbano 23
1.2 Descrição do trabalho 24
1.3 Organização da Tese 26
2 ARQUIVO ARQUITECTÓNICO 27
2.1 Evolução 29
2.2 Requisitos 30
2.3 Fotogrametria terrestre 35
2.3.1 Ferramentas usadas na fotogrametria terrestre 37
2.3.1.1 Câmaras analógicas 39
2.3.1.2 *Scanners* 41
2.3.1.3 Câmaras digitais 42
2.3.1.4 Sistemas fotogramétricos 44
2.3.1.5 Pontos de controlo 46
2.3.2 Calibração de câmaras 47
2.3.3 Planeamento para a aquisição de dados 49
2.3.3.1 Fotografia/Imagem 50
2.3.3.2 Pontos de controlo 55
2.4 Varrimento laser terrestre 57
3 MODELOS TRIDIMENSIONAIS URBANOS 61
3.1 Processamento de dados para a construção dos modelos 3D 64
3.1.1 Fotogrametria Aérea 65
3.1.1.1 Planeamento para a aquisição de dados 66
3.1.1.2 Pré-Processamento dos dados 67
3.1.1.3 Extracção de informação 67
3.1.2 Varrimento Laser aéreo 68

3.2 Modelação e Renderização – Reconstrução do modelo 3D 70
3.2.1 Modelação geométrica 71
3.2.2 Renderização 76
3.3 Visão geral de alguns sistemas existentes para modelação 3D urbana 78
4 VISUALIZAÇÃO 81
4.1 Descrição geral 82
4.2 Técnicas disponíveis e ferramentas de visualização 87
4.2.1 Animações 3D 88
4.2.2 *Virtual Reality Modelling Language* e GeoVRML 90
4.2.3 Sistemas de visualização de alta e baixa performance 93
4.3 Problemas e limitações 95
5 CASO DE ESTUDO 97
5.1 Objectivos 97
5.2 Descrição da área de estudo 98
5.3 Descrição do trabalho 100
5.3.1 Dados e produtos resultantes 101
5.3.2 Recursos 102
5.4 Aquisição de dados 106
5.4.1 Calibração das câmaras fotográficas 106
5.4.2 Planeamento e aquisição das fotografias/imagens 110
5.4.2.1 Fotogrametria estereoscópica 111
5.4.2.2 Fotogrametria convergente monoscópica 115
5.4.3 Planeamento e aquisição dos pontos de controlo 118
5.5 Arquivo Arquitectónico 120
5.5.1 *ImageStation* SSK 121
5.5.2 *PhotoModeler* 4.0 126
5.6 Modelo tridimensional urbano 141
5.6.1 Aquisição de informação base 142
5.6.2 Modelação geométrica 143
5.6.3 Renderização 147
5.7 Visualização 155
5.7.1 Animações 155
5.7.2 VRML - *Cosmoplayer* 156
5.7.3 Criação do registo multimédia do Arquivo Arquitectónico 158
5.8 Análise comparativa - Fotogrametria estereoscópica versus monoscópica 163
5.8.1 *ImageStation* SSK 164
5.8.2 *PhotoModeler* 4.0 166
5.8.3 Análise comparativa global 168

6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES 171

APÊNDICE A - FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRIA 177
A-1 Projecção perspectiva 177
A-2 Orientação Interna 180
A-3 Orientações relativa 184
A-4 Orientação Absoluta 186
A-5 Triangulação áerea 187
A-6 Geometria convergente multi-imagem 188
APÊNDICE B – RECTIFICAÇÃO DIGITAL 193
REFERÊNCIAS 197

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquerda: vista da fachada Norte de uma Catedral em Modena, Itália; direita: vista da fachada principal de uma Igreja na Maia, Porto. 28

Figura 2.2 – Esquema de diálogo entre o produtor de informação e o utilizador. 31

Figura 2.3 – Sistemas de aquisição e extracção de informação utilizados na Fotogrametria terrestre. 38

Figura 2.4 – Exemplo de uma câmara estéreo-métrica. 39

Figura 2.5 – O "caso normal" na Fotogrametria terrestre. 50

Figura 2.6 – Planeamento da aquisição de fotografias pelo "caso normal". 51

Figura 2.7 – Posição "ideal" das câmaras fotográficas para a cobertura de uma fachada e de um objecto com a forma de um cubo. 53

Figura 2.8 – Erro associado às posições da câmara: a) posição da câmara em estações colocadas perto do ângulo recto; b) posição da câmara em estações com pouca separação angular. 54

Figura 2.9 – Posições ideais de uma câmara para a cobertura fotográfica de uma "torre". 54

Figura 2.10 – Exemplos de alvos retro-reflectores com marca. 56

Figura 2.11 – Distribuição e número de pontos de controlo: a) caso de um cubo; b) caso de uma torre. 57

Figura 2.12 – Imagens do Coliseu de Roma obtidas a partir dos dados 3D adquiridos por laser *scanner*. 59

Figura 3.1 – Extracto do modelo 3D da cidade de Los Angeles. 61

Figura 3.2 – Principais etapas na criação de modelos 3D urbanos. 62

Figura 3.3 – Esquema das componentes do sistema ALS e transferência de dados entre elas. 69

Figura 3.4 - Aplicação em modelos 3D urbanos. 70

Figura 3.5 – Aplicação em obras viárias. 70

Figura 3.6 – Informação base, modelação geométrica e renderização. 71

Figura 3.7 – Modelo 3D de um conjunto de edifícios modelado em estrutura de arame. 72

Figura 3.8 – Modelo 3D de um conjunto de edifícios obtido com modeladores de superfícies. 73

Figura 3.9 – Modelo 3D de um conjunto de edifícios obtido com modeladores volumétricos. 74

Figura 3.10 – Estrutura BRep e CSG relativa ao mesmo objecto. 75

Figura 3.11 – Exemplo de um edifício renderizado com textura artificial (esquerda) e o mesmo edifício renderizado com a textura real (direita). 77

Figura 4.1 – Reconstrução e visualização 3D com o *software Microstation*. 84

Figura 4.2 – Visualização 3D de uma mina de carvão com sobreposição de curvas de nível. 84

Figura 4.3 – Visualização 3D de objectos reais misturados com virtuais. 85

Figura 4.4 – Modelo virtual de Londres em VRML. 85

Figura 4.5 – Olímpia virtual. A experiência oferecida aos visitantes foi desenvolvida em *Macromedia* Director. 86

Figura 4.6 – Sequência de quatro fotogramas chaves, para um percurso pré determinado, realizado com *Microstation*. **89**

Figura 4.7 – Visualização através do voo virtual sobre situação existente (esquerda) e depois sobre o desenvolvimento proposto (direita), obtida com o *software ArcView*/3D *Analyst*. **90**

Figura 4.8 – Modelos obtidos em *Microstation* e exportados em VRML. **91**

Figura 4.9 – Visualização do modelo virtual da cúpula de Hagia Sophia utilizando como visualizador VRML o *Cosmoplayer*. **92**

Figura 4.10 – Alguns exemplos de visualização de modelos virtuais no *IMAGINE VirtualGIS*. **94**

Figura 5.1 – Igreja Matriz de Oeiras. **99**

Figura 5.2 – Igreja Matriz de Ponta Delgada. **99**

Figura 5.3 – Exemplo do tecido urbano das cidades de Ponta Delgada (esquerda) e de Oeiras (direita). **99**

Figura 5.4 – Resumo das etapas necessárias para a criação do arquivo arquitectónico e modelo 3D urbano. **100**

Figura 5.5 – Grelha de calibração com padrão repetido. **107**

Figura 5.6 – Imagens adquiridas para o processo de calibração da Rollei. **108**

Figura 5.7 – Curvas de distorção das lentes desenhadas com os parâmetros obtidos pelo *software Calibrator* 4.0 e para as quatro câmaras. **109**

Figura 5.8 – Curvas de distorção das lentes das duas câmaras métricas utilizando os valores fornecidos no relatório de calibração do fabricante. **109**

Figura 5.9 – Plano fotográfico para a cobertura da Igreja Matriz de Oeiras. **113**

Figura 5.10 – Exemplo de um par estereoscópico, da fachada Sul da Igreja Matriz de Oeiras, obtido com a câmara métrica digital. **113**

Figura 5.11 – Exemplo de um par estereoscópico, de uma parte da fachada principal da Igreja Matriz de Ponta Delgada, obtido com a câmara semi-métrica. **114**

Figura 5.12 – Plano fotográfico para a cobertura da Igreja Matriz de Ponta Delgada. **114**

Figura 5.13 – Plano fotográfico (geometria convergente) para a cobertura da Igreja de Oeiras. **115**

Figura 5.14 – Fotografias da fachada principal da Igreja de Oeiras obtidas com a câmara digital métrica: a) com orientação da esquerda, b) com orientação da direita e c) com posição central à fachada. **116**

Figura 5.15 – Fotografias da fachada principal da Igreja de Oeiras adquiridas com a câmara digital não métrica. **117**

Figura 5.16 – Algumas das fotografias da fachada principal adquiridas com a câmara analógica semi-métrica. **117**

Figura 5.17 – Fotografia de transição entre a fachada Oeste da Igreja de Oeiras e a fachada Norte obtida com a câmara métrica digital. **117**

Figura 5.18 – Exemplos de pontos de controlo naturais. **118**

Figura 5.19 – Exemplos de pontos de controlo naturais que não devem ser escolhidos, uma vez que na imagem é de difícil identificação o local exacto que foi medido em campo, devido ao fraco contraste. **118**

Figura 5.20 – Exemplos de marcação de pontos de controlo na fotografia e croqui dos pontos que possam suscitar dúvidas na sua identificação. **120**

Figura 5.21 – Diagrama geral representativo das etapas a efectuar no SSK para obter coordenadas tridimensionais dos pontos de pormenor e a restituição do detalhe. **121**

Figura 5.22 – Alçado principal da Igreja de Ponta Delgada á escala aproximada de 1:200 125

Figura 5.23 – Esquema geral das etapas a efectuar no *PhotoModeler* para a extracção de informação. 126

Figura 5.24 – Exemplo de referenciação de pontos: a amarelo estão os que já foram referenciados. A imagem 1 serve de referência para as outras imagens. 128

Figura 5.25 – Caixa de diálogo com a informação sobre a qualidade do primeiro processamento. 129

Figura 5.26 – 3D *Viewer*: visualizador tridimensional. 129

Figura 5.27 – *Point Table*: informação qualitativa da aplicação do algoritmo de ajustamento por feixes. 130

Figura 5.28 – *Point Audit All*: informação sobre os pontos (número de identificação, n.º das fotografias onde se encontra, etc). 131

Figura 5.29 - Evolução do modelo 3D, visualizado no 3D *Viewer*, á medida que se vão adicionando fotografias, pontos e linhas. 132

Figura 5.30 – Alçado da fachada principal e ampliação de uma dada zona. 133

Figura 5.31 – Alçado Oeste (esquerdo) e alçado Sul (direita) da Igreja Matriz de Oeiras á escala 1/100. 135

Figura 5.32 – Alçado Norte (esquerda) e alçado Este (direita) da Igreja Matriz de Oeiras á escala de 1/100. 137

Figura 5.33 – Perspectiva NW do modelo vectorial da Igreja Matriz de Oeiras. 139

Figura 5.34 – Perspectiva NE do modelo vectorial da Igreja Matriz de Oeiras. 139

Figura 5.35 – Perspectiva SE do modelo vectorial da Igreja Matriz de Oeiras. 140

Figura 5.36 – Perspectiva SW do modelo vectorial da Igreja Matriz de Oeiras. 140

Figura 5.37 – Esquema representativo das etapas de reconstrução para a criação do modelo 3D urbano com texturas reais. 141

Figura 5.38 – Modelo digital de terreno de parte da cidade de Oeiras renderizado e com as curvas de nível sobrepostas, visualizado de uma determinada perspectiva. 143

Figura 5.39 - a) renderização do resultado de restituição visto de cima; b) uma perspectiva de frente de forma a visualizar a informação 3D dos telhados dos edifícios. 143

Figura 5.40 – Exemplo de objectos (cúpulas) que não foram modelados utilizando modelos de superfícies. 144

Figura 5.41 – Projecção dos limites do telhado no terreno. 145

Figura 5.42 – Superfície criada entre uma das arestas do telhado e respectiva projecção no terreno. 145

Figura 5.43 – Modelo 3D da envolvente à Igreja de Ponta Delgada renderizado com a cor utilizada na modelação. 146

Figura 5.44 – Modelo 3D da envolvente da Igreja de Oeiras renderizado com a cor utilizada na modelação. 146

Figura 5.45 – Principais etapas para a criação de uma textura real. 147

Figura 5.46 – Exemplo de fotografias adquiridas para criar a textura real a aplicar a determinada fachada. 148

Figura 5.47 – Exemplo do registo das fotografias duas a duas (1 com 3 e 2 com 4 da figura 5.46). 149

Figura 5.48 – Mosaico resultante das quatro imagens iniciais. 149

Figura 5.49 – Imagem rectificada resultante das quatro imagens iniciais. 149

Figura 5.50 – Imagens elucidativas da variação de luminosidade devida á escolha de diferentes tipos de luz. **151**

Figura 5.51 – Pormenor da fachada Sul da Igreja de Ponta Delgada. **152**

Figura 5.52 – Modelo 3D da zona que rodeia a Igreja Matriz de Oeiras. **152**

Figura 5.53 – Pormenor da Igreja Matriz de Oeiras com a mesma perspectiva da figura 5.52. **153**

Figura 5.54 – Pormenor do modelo 3D da Igreja Matriz de Oeiras e sua envolvente. **153**

Figura 5.55 – Pormenor do modelo 3D da Igreja Matriz de Oeiras e sua perspectiva NE. **153**

Figura 5.56 – Modelo 3D da Igreja Matriz de Oeiras de uma perspectiva NW. **154**

Figura 5.57 – Modelo 3D da Igreja de Oeiras de uma perspectiva SE. **154**

Figura 5.58 – Exemplo de um percurso definido pelo utilizador e respectivos fotogramas. **156**

Figura 5.59 – Visualização de um extracto do modelo 3D não texturizado no *CosmoPlayer*. **157**

Figura 5.60 – Visualização de um extracto do modelo 3D com texturas reais no *CosmoPlayer*. **157**

Figura 5.61 – Ecrã principal do *Macromedia Director*. **159**

Figura 5.62 – A janela *Score*. **160**

Figura 5.63 – A janela *Control Panel*. **161**

Figura 5.64 – Exemplo da interface geral da aplicação "Igreja Matriz de Oeiras – Arquivo Arquitectónico. **162**

Figura 5.65 – Organigrama de "navegação". **162**

Figura 5.66 – Resultados estatísticos para a análise das diferenças entre os resíduos obtidos antes (ABS) e após (RES) o processo de reamostragem, para as coordenadas (X, Y, Z). **165**

Figura 5.67 – Gráficos do resultado da análise de regressão para cada um dos eixos. **166**

Figura 5.68 – Resultados estatísticos do processamento de dados no *PhotoModeler*, para cada uma das câmaras utilizadas e para os eixos X, Y e Z. **167**

Figura A.1 – Projecção perspectiva. **178**

Figura A.2 – Condição de colinearidade. **178**

Figura A.3 – Efeitos da distorção radial na imagem: a) imagem geometricamente correcta, b) imagem distorcida com as maiores distorções perto do ponto principal, c) imagem com as maiores distorções afastadas do ponto principal. **183**

Figura A.4 – Coplanaridade. **185**

Figura A.5 – Posição de *Von Gruber*. **186**

Figura A.6 – Esquema da posição dos pontos de ligação entre fotografias e fiadas. **188**

Figura A.7 – Configuração convergente multi-imagem. **190**

Figura A.8 – Esquema elucidativo da influência que certas condições têm na colocação da câmara. **192**

Figura B.1 – Malha de pixels da imagem rectificada. **194**

Figura B.2 – Sistema pixel, fotográfico e câmara. **195**

Figura B.3 – Localização do pixel (l, c) na imagem rectificada. **195**

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Diferentes métodos de levantamento, suas vantagens, desvantagens e aplicações. **32**

Tabela 2.2 – Diferentes tipos de registos. **33**

Tabela 2.3 – Diferentes formas de apresentação do resultado final. **34**

Tabela 2.4 – Exemplos de câmaras analógicas métricas, estéreo-métricas e semi-métricas e não métricas. **40**

Tabela 2.5 – Exemplos de câmara digitais de baixa, média e alta resolução. **43**

Tabela 3.1 – Tipo de representação versus nível de detalhe. **64**

Tabela 3.2 – Técnicas de modelação e parametrização da geometria. **76**

Tabela 4.1 – Alguns *softwares* que incluem a visualização de informação. **88**

Tabela 4.2 – Alguns *softwares* de animação. **89**

Tabela 4.3 – Características de visualização dos *softwares IMAGINE VirtualGIS*, *PhotoModeler* e *ShapeCapture*. **95**

Tabela 4.4 – Formatos de dados 3D mais comuns. **96**

Tabela 5.1 – Estudos comparativos a efectuar com base nas diferentes câmaras (MA – métrica analógica, MD – métrica digital, NMD – não métrica digital) e diferentes métodos utilizados (Método E – método estereoscópico, Método C – método convergente). **98**

Tabela 5.2 – Instrumentação e *software* utilizado. **102**

Tabela 5.3 – Detalhe da instrumentação utilizada. **103**

Tabela 5.4 – Parâmetros de orientação interna das câmaras obtidas através do programa *Calibrator* 4.0. **108**

Tabela 5.5 – Parâmetros de orientação interna das câmaras providenciados no certificado de calibração das câmaras Rollei e Leica R5. **109**

Tabela 5.6 – Planeamento da cobertura fotográfica da Igreja de Oeiras tendo em consideração a escala 1:400 e as câmaras digital e analógica métricas. **112**

Tabela 5.7 – Resumo das variáveis e parâmetros envolvidos na definição do projecto. **122**

Tabela 5.8 – Resumo das variáveis e parâmetros na definição da câmara analógica e digital métricas. **122**

Tabela 5.9 – Resultados estatísticos do SSK referentes aos resíduos obtidos na restituição, i.e., depois da reamostragem. **164**

Tabela 5.10 – Resultados estatísticos do *PhotoModeler* referentes aos resíduos obtidos na restituição. **167**

Tabela 5.11 – Resultados do teste t e do teste F aplicado aos resíduos de cada par de câmaras tendo em atenção o método monoscópico (M) e o método estereoscópico (E). Os valores são apresentados em mícron. **169**

1

INTRODUÇÃO

1.1 O ARQUIVO ARQUITECTÓNICO E O MODELO TRIDIMENSIONAL URBANO

Existe grande preocupação em proteger os edifícios históricos e monumentos da degradação, fogo, tempestades, tremores de terra, cheias e outros desastres naturais. O arquivo arquitectónico, complementado pela informação geográfica do meio circundante, em conjunção com técnicas multimédia para a sua visualização, é uma ferramenta extremamente útil para preservação, restauro, reconstrução e reabilitação do património arquitectónico, sendo considerado uma necessidade civil de defesa no combate à sua extinção.

As principais organizações internacionais fundadas para desenvolver e coordenar a protecção do património arquitectónico incluem: o *International Committee for Architectural Photogrammetry* (CIPA), estabelecido pela *International Council of Monuments and Sites* (ICOMOS) em colaboração com a *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS), as quais colaboram com a UNESCO na elaboração da Lista do Património Mundial. Estas organizações estabeleceram que um monumento só pode ser protegido e restaurado se fôr completamente medido e documentado e reconheceram a Fotogrametria como o meio apropriado para efectuar estes registos.

"A Fotogrametria é a arte, ciência e técnica de determinação das propriedades geométricas entre outras, através de medições e observações de fotografias desses mesmos objectos" (Atkinson, 1980). A Fotogrametria terrestre encontra-se abrangida por esta definição mas faz parte de uma aplicação menos usual da Fotogrametria, que por norma é geralmente associada à produção cartográfica. Embora o registo fotogramétrico de fachadas de edifícios seja considerado a aplicação mais difundida logo a seguir às aplicações cartográficas, continua a prestar uma contribuição mínima para a totalidade dos produtos fotogramétricos.

A Fotogrametria arquitectural apesar de largamente implementada, nunca atingiu os níveis de padronização e popularidade da Fotogrametria aérea, devido essencialmente às caracteristicas dos objectos a cartografar. A Fotogrametria digital veio introduzir novos desafios, contribuindo para o desenvolvimento da Fotogrametria terrestre, através do incremento das suas potencialidades e tipo de aplicações, além de facilitar a sua implementação a interessados de diversas áreas que não apenas os especialistas na matéria.

Juntamente com a criação do arquivo arquitectónico, a UNESCO defende que os objectos, neste caso monumentos, só podem ser completamente entendidos e documentados tendo em consideração a paisagem envolvente dos mesmos. Neste contexto, quando os edificios históricos se encontram integrados em zonas urbanas, é necessário o registo do modelo tridimensional do meio em que o monumento se encontra inserido. Este facto, alarga o número de utilizadores e promove a ligação entre a preservação do património edificado e a administração urbana.

Finalmente, a utilização de técnicas multimédia para apresentação e visualização de dados geográficos contribui para o enriquecimento do arquivo aquitectónico inserido no modelo tridimensional urbano correspondente. A utilização de novas técnicas de aquisição de dados, processamento, modelação e visualização tridimensional providenciam meios inovadores para a sua criação e divulgação constituindo um sistema valioso para o apoio à preservação do património arquitectónico, nas áreas do turismo histórico e ainda no planeamento urbano.

1.2 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Apesar de a Fotogrametria ser uma ciência com um passado histórico que remonta pelo menos aos finais do séc. XIX, tendo comprovado ao longo dos tempos a sua importância em muitas e diversas áreas, foi na aplicação relacionada com a cartografia baseada na fotografia aérea da superfície terrestre que se processou a sua evolução. Desde muito cedo foi reconhecida como uma ciência com numerosas outras aplicações incluídas no que se passou a denominar como Fotogrametria Terrestre, e que contemplam a arquitectura, arqueologia, medicina, estudos forenses, industria e engenharia. A Fotogrametria terrestre devido à sua diversidade e pela especificação de cada caso dentro de cada aplicação, tornou-se num ramo da Fotogrametria menos divulgado e desenvolvido, e por conseguinte, de mais dificil implementação.

Embora partilhe os princípios matemáticos fundamentais, a Fotogrametria aérea surge como uma aplicação simplificada e padronizada da Fotogrametria em geral, quando comparada com a

Fotogrametria terrestre. Assim, desde o processo de aquisição de dados, até ao processamento dos mesmos, finalizando com a visualização dos resultados através de técnicas multimédia, este trabalho constituiu uma base de aprendizagem que se pretende possa vir a servir como apoio a interessados neste tipo de estudos.

Foi efectuada uma pesquisa intensa de trabalhos publicados sobre o tema desta tese, nomeadamente na área da Fotogrametria relacionada com a elaboração de arquivos arquitectónicos e modelos tridimensionais urbanos, assim como sobre as potencialidades da utilização das técnicas multimédia na divulgação dos resultados. O trabalho teórico introdutório permite uma visão abrangente do problema, demonstrando a sua vasta dimensão e potencial de investigação. Pretende-se que por si só a base teórica constitua um documento que venha a poder servir de apoio a outros estudos, uma vez que, no âmbito e dimensão deste trabalho, nunca se poderiam explorar no trabalho prático todas as possibilidades.

Os estudos referentes à implementação de um sistema de registo e de processamento utilizando técnicas e instrumentação disponíveis, serviram de base para avaliar os procedimentos, em termos de precisão, envolvidos na aplicação da Fotogrametria ao registo preciso de fachadas de edifícios históricos e à elaboração de modelos tridimensionais urbanos, no qual se encontram incluídos. O trabalho consistiu na implementação prática de diferentes tipos de planeamento de aquisição de dados, consoante o tipo de metodologia a aplicar (monoscópico convergente ou estereoscópico "caso normal"), incluindo a própria aquisição utilizando diversos tipos de câmaras (digitais e analógicas, métricas e não métricas), e a obtenção do respectivo controlo topográfico. Seguidamente procedeu-se à extracção de informação pelos diferentes métodos e consequente obtenção do produto final, finalizando-se com a aplicação de técnicas de visualização para a apresentação dos resultados.

Assim sendo, apesar do reconhecimento de que sendo um assunto de tão vastas dimensões não foi possível abordar muitos aspectos e questões pertinentes, os quais ficarão por responder em trabalhos futuros, espera-se que este estudo, além de ter constituído um importante meio de aprendizagem para o próprio autor, venha de alguma forma contribuir para o esclarecimento e divulgação da aplicação da Fotogrametria à preservação e divulgação do património arquitectónico no nosso país.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada em seis capítulos e dois apêndices, divididos em secções e subsecções.

No Capítulo 2 abordam-se os processos envolvidos na criação de um arquivo arquitectónico, dando-se especial relevo à aquisição de dados por Fotogrametria terrestre, uma vez que foi o método empregue no trabalho prático e por se ter detectado, durante a pesquisa efectuada, que esta área está relativamente pouco documentada em termos actualizados.

No Capítulo 3 descrevem-se as aplicações, o estado de arte, os processos de aquisição de dados e os métodos de modelação utilizados na elaboração de modelos tridimensionais urbanos, fundamentais para a caracterização da zona envolvente aos monumentos em estudo e respectivo arquivo arquitectónico.

No Capítulo 4 é apresentada uma compilação sobre métodos e técnicas de visualização de dados tridimensionais. Optou-se por uma abordagem do ponto de vista do utilizador, dado que este tema é um complemento ilustrativo das vantagens da utilização destas técnicas na divulgação e utilização do arquivo arquitectónico e modelo tridimensional urbano, não se justificando portanto o seu aprofundamento em termos de implementação e criação do próprio *software*.

No Capítulo 5 são descritas todas as metodologias adoptadas para a criação do arquivo arquitectónico e do modelo tridimensional urbano da zona envolvente aos monumentos em estudo, desde o planeamento e aquisição dos dados para a elaboração do trabalho até à extracção de informação, concluindo com a aplicação de técnicas de visualização. Este capítulo inclui também a apresentação, discussão e análise de resultados estatísticos.

As conclusões do trabalho são apresentadas no Capítulo 6, abordando-se também algumas propostas de trabalho futuro, que poderão melhorar alguns dos procedimentos com vista a optimizar o trabalho.

No Apêndice A apresentam-se, muito resumidamente, os fundamentos teóricos que suportam a Fotogrametria e no Apêndice B descreve-se também o processo de rectificação digital de imagens.

2

ARQUIVO ARQUITECTÓNICO

Um arquivo arquitectónico consiste na documentação detalhada de edifícios e monumentos, históricos ou de interesse patrimonial, que inclui, para além de informação descritiva dos monumentos (a sua história, estilo, ano de construção, etc.), o levantamento preciso da sua geometria, a documentação do seu estado actual e o levantamento das suas fachadas. Hoje em dia, com o avanço da tecnologia, pode dizer-se que um arquivo arquitectónico é uma base de dados digital, geométrica e alfanumérica, sobre os monumentos, onde tem lugar também a criação e visualização de modelos tridimensionais dos mesmos, permitindo deste modo uma análise "virtual" do objecto em causa.

O levantamento do monumento deverá ser completo para que o arquivo arquitectónico contenha toda a informação necessária que sirva os propósitos do arquitecto, nomeadamente no que diz respeito à restauração e preservação. Para que estas sejam possíveis é necessário que tenham sido recolhidos dados suficientes para obter desenhos ou modelos numéricos que permitam a reprodução do edifício em diferentes projecções, incluindo alçados, cortes ou perfis, vistas axonométricas, entre outras (Jachimski, 1996). Segundo Carbonnell (1989), o arquivo arquitectónico pertence ao chamado levantamento arquitectónico de precisão, sendo no entanto, um registo de âmbito mais generalista, permitindo, deste modo, uma "documentação sistemática dos monumentos principais", uma vez que não é tão pormenorizado. A Figura 2.1 ilustra um dos tipos de registo (alçados) pertencente a um arquivo arquitectónico.

A documentação de eventos, religião, cultura ou esquemas arquitectónicos, entre outros, foi desde os primórdios das civilizações, uma prática protegida pelos vários poderes que permitiu aos arquitectos e historiadores estudar, reconstruir e preservar inúmero património (Tringham, 2000). A conservação do património arquitectónico tornou-se muito mais importante após a segunda guerra mundial, tendo esse interesse conduzido, em 1964, à elaboração da Carta Internacional Sobre a Conservação e Restauro dos Monumentos e dos Sítios Históricos – A Carta de Veneza (URL1). Esta carta considera as obras monumentais como testemunho vivo de um povo, passando a sua conservação, recuperação e valorização a ter um interesse estético, técnico e histórico. Vários países começaram então a

institucionalizar programas de conservação e salvaguarda de monumentos históricos, através das organizações nacionais ou internacionais de conservação do património. A nível internacional destacam-se a UNESCO (*United Nations for Education, Science and Culture Organization*) (Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura) e a ICOMOS (*International COuncil of MOnuments and Sites*) (Conselho Internacional de Monumentos e Sítios). A nível nacional destacam-se a DGEMN (Direcção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais) e o IPPAR (Instituto Português do Património Arquitectónico), que tem como missão a salvaguarda e a valorização de bens materiais imóveis que, pelo seu valor histórico, artístico, científico, social e técnico, integrem o património arquitectónico do País.



Figura 2.1 - Esquerda: vista da fachada norte de uma Catedral em Modena, Itália (Carbonell, 1989); direita: vista da fachada principal de uma Igreja na Maia, Porto .

A criação de um arquivo arquitectónico é importante sob vários aspectos: os desenhos nele contidos podem servir de ferramenta de trabalho sempre que seja necessário fazer alterações ou restauração dos monumentos (Dallas, 1980); o registo existente dos monumentos torna-se de crucial importância sempre que, quer por acção humana quer por catástrofes naturais, detalhes das fachadas ou outros objectos tenham de ser reconstruídos; é também importante na realização de estudos históricos (Carbonnell, 1989) e serve ainda para organizar e ordenar dados existentes de um monumento, tornando mais simples a reconstituição do seu passado, a sua interpretação e a perpetuação do conhecimento (Arnold, 2000).

Pode então concluir-se que, a importância da documentação e registo do património cultural é inegável e imprescindível face ao estado, por vezes, de risco e degradação em que se encontra grande parte do actual património (Arnold, 2000).

A criação, manipulação e visualização de modelos 3D dos objectos pertencentes ao património cultural dão ao arquivo arquitectónico funções diferentes das atrás descritas, entre elas: visualização dos objectos a partir de pontos de visão diferentes, impossíveis no mundo real, quer devido ao tamanho do objecto, quer devido à sua envolvente (El-Hakim *et al.*, 2002); interacção com os objectos sem correr o risco de os danificar; visualização "virtual" de modificações e interacções feitas no objecto em estudo, para auxílio da tomada de decisões; criação de museus e turismo virtuais, a que se pode ter acesso, por exemplo, a interiores de monumentos históricos que se encontram fechados ao público por questões de segurança.

2.1 EVOLUÇÃO

Os métodos de registo do património cultural, nomeadamente o arquitectónico, tiveram grande evolução, desde os desenhos em rochas, texto em papiros, pinturas, etc., até à representação bidimensional usando papel e às técnicas digitais do presente (Tringham, 2000). Nos nossos dias, o método tradicional para a criação de registos não digitais sobre o património tem sido levado a cabo recorrendo a fotografias, filmes, desenhos, levantamentos arquitectónicos e documentos escritos. Na realidade, os primeiros levantamentos de monumentos eram realizados por métodos rudimentares: fita métrica, fios de prumo, níveis, teodolitos, lápis e papel. A utilização destes instrumentos permitia ao arquitecto efectuar o levantamento e desenho da geometria do edifício, directamente em frente ao mesmo com grande controlo, tanto no que diz respeito ao levantamento como ao desenho propriamente dito (Weferling, 2000).

Este controlo requerido por parte do arquitecto dificultava a introdução de novos métodos, mais precisos e mais rápidos. No entanto, com o aparecimento da Fotogrametria e comprovação do seu valor, rapidamente surge a ideia, por volta de 1840, de usar as suas potencialidades em levantamentos arquitectónicos. Em 1867, o arquitecto alemão Albrecht Meydenbauer introduziu o termo "Fotogrametria arquitectural" nos levantamentos arquitectónicos, tendo realizado o primeiro levantamento de monumentos através de métodos fotogramétricos nesse mesmo ano. No entanto, em muitos países, a sua utilização era reduzida, uma vez que a maioria dos arquitectos responsáveis pela conservação do património cultural nacional, ou os não conheciam ou não mostravam interesse. Apenas em 1964, com a Carta de Veneza, a Fotogrametria arquitectural surge novamente com a introdução de *um novo*

conceito de conservação (Carbonnell, 1989). As organizações internacionais responsáveis pelo património cultural tiveram também muita influência no uso da Fotogrametria na arquitectura: a UNESCO recomendou vivamente o uso da Fotogrametria, promoveu formação nesta área, contribuiu para a criação de laboratórios para efectuar levantamentos e, decretou que todos as grandes operações de salvaguarda internacional de monumentos e locais históricos tenham como pré-requisito a necessidade de levantamentos fotogramétricos.

A ICOMOS, organização não governamental, também deu o seu contributo realizando, em 1968, o primeiro Simpósio Internacional de Aplicações da Fotogrametria na Documentação de Monumentos e Locias, onde se recomendou a formação do CIPA (*Comité International de la Photogrammétrie Architecturale*). Em 1970 é efectivamente constituída o CIPA – um comité internacional especializado do ICOMOS, em cooperação com o ISPRS (*International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*). A ISPRS e o ICOMOS criaram o CIPA por considerarem que um monumento só pode ser restaurado e protegido se tiver sido completamente medido, documentado e registado. Esta instituição tem como principal objectivo o melhoramento e desenvolvimento de todos os métodos de levantamento do património cultural, com ênfase na Fotogrametria ou métodos onde esta esteja presente, que possam contribuir para o registo e monitorização da herança cultural, para a preservação e restauração de monumentos, objectos ou locias com valor cultural.

Pode, deste modo, entender-se que a Fotogrametria é a ciência aplicada, por excelência, ao registo do património cultural, contribuindo assim para a constituição dos arquivos arquitectónicos. Na realidade, a Fotogrametria tornou-se de tal forma importante na documentação de monumentos que, em 1987, o ICOMOS aprovou, na sua oitava Assembleia Geral, a resolução que aponta a constituição de Arquivos Fotogramétricos como a ferramenta adequada à documentação científica e registo do património cultural existente.

Esta parte da Fotogrametria, dedicada a levantamentos arquitectónicos, entre variadíssimas aplicações é designada por Fotogrametria terrestre, e será tratada com mais pormenor no decorrer deste capítulo.

2.2 REQUISITOS

O levantamento e registo de monumentos e locais históricos requerem, por parte do operador, um conhecimento que vá para além do conhecimento geodésico ou fotogramétrico e que se enquadre nos requisitos do que é pedido. Talvez seja por isso que se torna cada vez mais importante que profissionais ligados à história, arquitectura e arqueologia tenham um diálogo aberto com os profissionais da Geodesia, Topografia e Fotogrametria, de forma a que tenham conhecimento das

várias técnicas existentes para aquisição de informação e sua precisão, interagindo com os produtores de informação de forma a esclarecer dúvidas, estabelecer requisitos e ajudar a tomar decisões.

Com base no pedido de um dado levantamento, procede-se à análise dos objectivos do cliente, estudando o objecto em causa para selecção do(s) método(s) de levantamento que melhor se adequa ao pretendido (Figura 2.2). O cliente é considerado primordial em todo o processo uma vez que a definição concreta dos objectivos a que se destina o trabalho é feita por ele. Ao director técnico do trabalho cabe absorver essa informação e explicar ao cliente as várias possibilidades e o que elas envolvem a nível de custos, precisão e tempo.

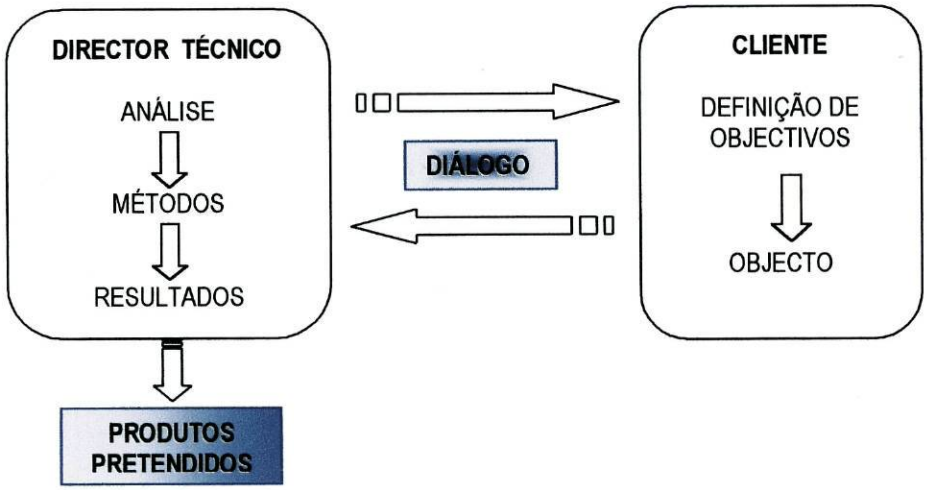


Figura 2.2 - Esquema de diálogo entre o produtor de informação e o utilizador.

A dificuldade nesta área de trabalho prende-se com o facto de a extracção e representação da informação requerida serem procedimentos complexos. A extracção adequada da informação requer não somente a escolha adequada de um método de levantamento, mas também um modelo de representação dos objectos. A representação do resultado final pode influenciar o método de levantamento ou a necessidade de incluir informação adicional.

Cada um dos aspectos referidos abarcam diversos procedimentos, com os quais o produtor de informação deve estar familiarizado. Mesmo que apenas esteja em causa o registo dos dados geométricos do objecto, e omitindo as áreas relacionadas com dados não geométricos, o seu conhecimento torna-se importante, justificando uma descrição detalhada de cada um dos procedimentos:

- **Métodos de levantamento** – existem alguns métodos de levantamento que podem ser utilizados (Tabela 2.1). A sua escolha está dependente do tipo de informação e também do tipo de apresentação requeridos e para além disso deverá ser o mais económico possível. Nesta selecção do método é muito importante ter em consideração a relação objecto-precisão-preço e muitas

vezes ainda, o tempo de realização do trabalho. No entanto, o factor mais importante a ter em conta é, sem dúvida, a precisão. Há, no entanto excepções, como por exemplo, quando é pedido somente a visualização do modelo 3D renderizado (3.2.2) com as fotografias rectificadas.

Tabela 2.1 – Diferentes métodos de levantamento, suas vantagens, desvantagens e aplicações.

	MÉTODOS	VANTAGENS	DESVANTAGENS	APLICAÇÕES	PALAVRAS CHAVE
MÉTODOS DIRECTOS	Medição Manual	- uso imediato - resultados *in situ* - material de baixo custo	- medição sem ligação espacial - desfavorável propagação de erros - muito moroso	- "facility management", - medições suplementares e de controlo.	- fita métrica - fio de prumo - distanciómetro portátil - distanciómetro laser
	Taqueometria	- grande precisão e exactidão dos pontos - algumas funções de gravação automática: perfis, alçados, elevação remota - possibilidade de resultados na altura	- demasiado lento para obter uma nuvem de pontos - moroso e caro - não se pode aplicar a levantamento de objectos pequenos	- levantamento arquitectónico - preservação e conservação de monumentos históricos - sítios arqueológicos - análises arquitecturais - documentação - fachadas	- estação total - laser "reflectorless" - PC-direct.
MÉTODOS INDIRECTOS	Fotogrametria Terrestre	- pouco tempo em campo - muito apropriado para visualização - é possível a medição de objectos em movimento	- necessidade de pontos de controlo - o contraste tem de ser suficiente - necessidade de boa luminosidade - a intersecção pode ser difícil. - instrumentos caros	- arquivos arquitecturais - preservação e conservação de edifícios históricos - planimetria - modelação de estruturas - levantamento arquitectónico - fachadas - visualização	- calibração - câmara métrica - ajuste por feixes - Fotogrametria digital - Correlação de imagem"
	Laser *Scanning*	- rapidez - alta densidade de pontos - levantamento controlado por computador - não há problemas com o contraste e iluminação do objecto - grande precisão - rápida obtenção do modelo	- instrumentos grandes e caros - aumento de distância=diminuição de precisão - não aquisição de pontos individuais - necessidade de pontos de controlo	- levantamento de plantas industriais - levantamento arquitectónico - "facility management" - esculturas - deformações - detalhes arquitecturais e arqueológicos.	- medição rápida de distâncias - elementos polares - nuvem de pontos - princípio da triangulação

Na Tabela 2.1 os métodos de levantamento são divididos em directos e indirectos. Os métodos directos são o chamado manual e a taqueometria. O primeiro ainda é referido uma vez que é um dos mais antigos e também pode servir como complemento de todos os outros, para pequenas completagens. Este método, só por si, não é muito prático nos levantamentos arquitectónicos, uma vez que se torna bastante moroso e dispendioso. Além disso, a extracção de informação por este meio tem de ser feita no local. A Fotogrametria e o Laser *Scanning* são métodos que tratam o objecto como um todo. Nestes

métodos a extracção de informação é feita posteriormente. São métodos muito precisos no que diz respeito ao desenho gráfico e muito vocacionados para as novas técnicas de apresentação do modelo tridimensional, como visualizações fotorealísticas e panorâmicas, animações e simulações.

- **Registos** – cada tipo de edifício tem características diversas que podem ser registadas com diferente qualidade e precisão, dependendo dos objectivos e consequentes requisitos das observações e registo.

Podem considerar-se quatro tipos diferentes de registos de informação (Tabela 2.2), que serão descritos seguidamente.

Tabela 2.2 – Diferentes tipos de registos (Adaptada de Scherer, 2001).

REGISTOS	DOCUMENTAÇÃO ANÁLISE DE EDIFÍCIOS	PRESERVAÇÃO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS E MONUMENTOS	ARQUIVO ARQUITECTÓNICO	"FACILITY MANAGEMENT"
PRECISÃO	[3 mm , 1 cm]	[1 cm , 2 cm]	[2 cm , 5 cm]	[3 cm , 10 cm]
CARACTERÍSTICAS	Local, análise de patologias	Fornecer um modelo preciso da forma geométrica	Apresentação numa forma adequada a fins arquitectónicos	Determinação de áreas, posicionamento para atributos
ESCALA	1:20 a 1:10	1:50 a 1:20	1:100 a 1:50	1:500 a 1:200

a. **documentação e análise de edifícios**, que inclui a observação de cada uma das pedras das fachadas e também a análise das patologias pedra a pedra. Neste tipo de levantamento, utilizado em menor número (Carbonell, 1989), a precisão requerida pode ir desde três milímetros até um centímetro;

b. **Preservação e restauro de edifícios históricos e monumentos**, onde o arquitecto responsável especifica as partes do monumento que vão ser tratadas, bem como a natureza das observações a serem feitas e os documentos a serem estabelecidos (Carbonell, 1989). Este tipo de levantamento requer precisão de um ou dois centímetros;

c. **Arquivo arquitectónico**, onde se insere a maioria dos levantamentos, utilizado para registo sistemático de monumentos, podendo envolver o levantamento de todas as fachadas de determinadas ruas, em especial pertencentes a zonas antigas das cidades. Neste caso a precisão requerida é de dois a cinco centímetros;

d. ***"Facility management"*** – quando é necessário efectuar apenas medições de áreas ou posicionar os edifícios para a atribuição de atributos, podendo a precisão ir de três a dez centímetros.

A precisão para os vários tipos registos não é completamente distinta entre os vários casos havendo algumas sobreposições. Note-se, no entanto, que o decréscimo de precisão de uns para os outros é bem visível.

- **Representação do resultado final** – hoje em dia existem inúmeras formas de apresentar o produto final depois de executado o levantamento arquitectónico, com as quais o produtor de informação deve estar familiarizado, mesmo que não seja ele a levá-lo a cabo. Existem vários meios de apresentação desses resultados, tradicionais ou inovadores, estes últimos tirando partido da evolução de toda a tecnologia multimédia, informática e de fotorealismo. A Tabela 2.3 resume algumas das formas de apresentação que podem ser utilizadas:

  a. **A representação numérica**, em formato analógico e/ou digital, permitindo uma representação muito precisa dos dados, mas pouco elucidativa e atraente a nível visual e pouco prática se o cliente quiser trabalhar sobre eles (o que é muitas vezes o objectivo).

  b. **A representação visual**, onde os resultados podem também ser apresentados em formato analógico e/ou digital, na forma de desenhos de alçados, cortes, etc, muito eficazes para a realização de medições e projectos. Este formato é mais atraente, pois é visualizado e portanto mais fácil de interpretar e perceber, dando uma noção exacta da forma e característica dos objectos, quer em termos de visualização fotorealística dos modelos tridimensionais, quer com a possibilidade de animação e simulação de novas situações. Tem também um papel importante na divulgação e conhecimento do monumento.

Tabela 2.3 – Diferentes formas de apresentação do resultado final.

<table>
<tr><th>REPRESENTAÇÃO NUMÉRICA</th><th colspan="2">REPRESENTAÇÃO VISUAL</th></tr>
<tr><td rowspan="2">DADOS NUMÉRICOS:
- coordenadas
- medições
- superfícies</td><td>DESENHO</td><td>VISUALIZAÇÃO</td></tr>
<tr><td rowspan="2">- alçados das fachadas
- cortes
- perfis verticais
- plantas
- patologias pedra a pedra
- modelo grelha, e.g., rede de triângulos</td><td rowspan="2">- desenho
- panorama
- modelo 3D com textura/renderização
- passeios fotorealísticos, pré calculados ou livres
- cd-rom interactivo, multimédia</td></tr>
<tr><td>DADOS ALFANUMÉRICOS:
lista de atributos e objectos</td></tr>
</table>

Pode, portanto dizer-se que existem dois tipos de apresentação, a apresentação numérica e a apresentação visual. A escolha de utilização de qualquer uma delas, ou das duas em simultâneo vai, sem dúvida, influenciar também o método utilizado para o levantamento. Hoje em dia, a apresentação convencional, feita à mão e apresentada em papel deixou de fazer sentido, uma vez que os próprios aparelhos utilizados no processo de levantamento registam as observações que são depois transferidas para um computador, ou seja, os dados passam a ser, quase integralmente em formato digital. Toda a representação digital, que pode posteriormente ser imprimida em papel, quer de desenhos de alçados e cortes, quer de planos contendo todas as pedras de uma fachada pode ser de grande precisão.

2.3 FOTOGRAMETRIA TERRESTRE

A Fotogrametria terrestre é uma área específica da Fotogrametria aérea que, ao contrário desta, utiliza fotografias tiradas a partir de câmaras colocadas na superfície terrestre. As câmaras devem ser portáteis, montadas em tripés ou suspensas em gruas ou outros dispositivos especialmente concebidos para o efeito (Wolf, 1993). Embora inicialmente as câmaras necessitassem de ser métricas, com o desenvolvimento das técnicas analíticas, nomeadamente no que diz respeito à facilidade em modelar matematicamente a geometria da câmara, rapidamente se passou a fazer uso de câmaras não métricas. Estas necessitam de ser calibradas, recorrendo-se a técnicas matemáticas, de tal modo precisas, que a Fotogrametria terrestre pode ser utilizada até na inspecção industrial (Mikhail *et al*, 2001). Além do desenvolvimento de técnicas analíticas, o avanço da Fotogrametria terrestre deu-se também devido à evolução dos sensores electrónicos, permitindo o uso de câmaras fotográficas digitais. Apesar da sua resolução e precisão serem menores do que nas câmaras analógicas, a possibilidade de obter imagens em tempo real e de usar sequências de imagens, fez com que a Fotogrametria terrestre fosse utilizada em novas aplicações. Além disso, a relação tempo–dinheiro foi melhorada substancialmente, dada a facilidade de se poder trabalhar com equipamento não dedicado e por isso mais barato.

O termo 'Fotogrametria terrestre' é usado quando se recorre a fotografias tiradas a curtas distâncias do objecto, normalmente, até 300 m (Kennert, 1980). Existem autores que defendem uma distância câmara-objecto mais curta, cerca de apenas 100 m (Kraus, 1993), o que na prática se verifica, uma vez que a distâncias de 300 m a precisão e a escala começam a não se adequar aos requisitos impostos pela Fotogrametria terrestre. Ao contrário da Fotogrametria aérea, a câmara e o objecto estão acessíveis, sendo possível efectuar medições directas para calcular as posições para a tomada das

fotografias, diminuindo o número de incógnitas no processo de orientação, mas aumentando os custos inerentes ao trabalho de campo que lhe está associado.

A Fotogrametria terrestre foi inicialmente utilizada para cartografar áreas onde os métodos tradicionais de levantamento, e.g. a taqueometria, eram mal sucedidos: em meados do século XIX, Laussedat desenvolveu métodos para cartografar a superfície da Terra, recorrendo a fotografias terrestres obtidas com câmaras métricas (Kennert, 1980). Hoje em dia, a Fotogrametria terrestre perdeu todo o interesse no que respeita à cartografia, tendo ganho importância nas mais diversas áreas, designadas vulgarmente por "não topográficas". As aplicações variam desde a agricultura, arqueologia, geologia, oceanografia, medicina, planeamento e arquitectura até industria e criminologia.

Uma das razões pela qual a Fotogrametria terrestre obteve tanto êxito nas áreas referidas deve-se ao facto de tornar possível a medição de objectos que não possam ser medidos directamente sem lhes tocar.

A Fotogrametria terrestre começou a ser muito cedo utilizada na arquitectura, não apenas como forma de registar as características dos edifícios e monumentos, mas também para a sua reconstrução e preservação. A rapidez de aquisição detalhada e precisa da informação sobre as fachadas e detalhes, faz com que a Fotogrametria terrestre seja cada vez mais utilizada nesta área, especialmente agora com a Fotogrametria digital. Outro aspecto importante prende-se com o facto das fotografias serem um meio de gravação preciso e durável, que pode ser usado à posteriori, representando com precisão o estado do edifício aquando da aquisição das mesmas. Hoje em dia, toma uma importância ainda mais relevante nesta área, uma vez que, permitindo a modelação tridimensional, torna possível efectuar animação, visualização (o mais realística possível) e também simulação de novas situações, permitindo aos arquitectos e projectistas uma visão mais geral e envolvente.

Este secção tem como finalidade descrever, sucintamente, o equipamento e técnicas utilizadas na Fotogrametria terrestre. Em foco estará a Fotogrametria terrestre digital, dada a sua rápida evolução nestes últimos anos, nomeadamente no que diz respeito à criação de arquivos e modelos tridimensionais de edifícios e monumentos – Fotogrametria arquitectónica.

2.3.1 FERRAMENTAS USADAS NA FOTOGRAMETRIA TERRESTRE

As ferramentas utilizadas para que seja possível efectuar trabalhos de Fotogrametria terrestre vão desde os sistemas de aquisição de imagem – câmaras fotográficas, métricas, não métricas, analógicas ou digitais e *scanners* até aos sistemas de extracção de informação - aparelhos de estéreo-restituição analíticos, estações fotogramétricas digitais e, mais recentemente, *softwares* especialmente criados para a aquisição da informação obtida por uma geometria de observação monoscópica convergente e multi-imagem (Apêndice A).

A aquisição de fotografias/imagens é um processo fundamental na Fotogrametria uma vez que elas são os dados básicos de entrada essenciais para que o restante processo de medições se possa efectuar. O seu processamento permite a sua transformação de forma a que seja possível efectuar medições sobre elas.

O equipamento inicialmente utilizado na Fotogrametria terrestre era semelhante ao que se utilizava na Fotogrametria aérea, com bastante sucesso. No entanto, surgia a necessidade de desenvolver métodos adicionais de tratamento fotogramétrico que tornassem o equipamento mais flexível e adaptável às diferentes condições que se encontravam nos locais de trabalhos, permitindo que a Fotogrametria terrestre provasse o seu potencial em muitas áreas da ciência e engenharia (Tait, 1980). A necessidade de equipamento especial bastante dispendioso deve-se ao facto de a Fotogrametria terrestre não permitir uma elevada standarização de métodos de observação, como acontece com a Fotogrametria aérea, uma vez que cada trabalho tem requerimentos muito próprios e especiais. Em adição, a aquisição de fotografias obedece usualmente a normas específicas, muitas vezes difíceis de concretizar, como por exemplo o "caso normal" estereoscópico (2.3.3). Com o aparecimento da Fotogrametria analítica, nomeadamente, com a invenção do restituidor analítico por U. V. Helava, em 1957, seria de esperar um grande avanço da Fotogrametria em geral, mas isso só acabou por acontecer nos finais da década de setenta (Atkinson, 1989). A Fotogrametria terrestre beneficiou imenso com este desenvolvimento de instrumentos analíticos, dado que, pela primeira vez era possível modelar matematicamente as características de câmaras que, anos antes, não poderiam ser usadas em Fotogrametria e conseguir os produtos finais desejados de uma maneira mais rápida, fácil e eficaz.

Hoje em dia, os sistemas de aquisição de imagem são desenvolvidos com base em sensores digitais e encontram-se no mercado a preços bastante acessíveis. Sistemas de aquisição que continuem a ter características especialmente pensadas para a Fotogrametria terrestre são a preços ainda bastante elevados. A principal vantagem dos sistemas digitais de aquisição de imagem prende-se com a possibilidade de utilizar as imagens directamente no computador onde podem ser imediatamente processadas, sem passar por fases intermédias como a rasterização.

A Figura 2.3 mostra um pequeno fluxograma resumindo os principais sistemas de aquisição e extracção de informação usados na Fotogrametria terrestre.

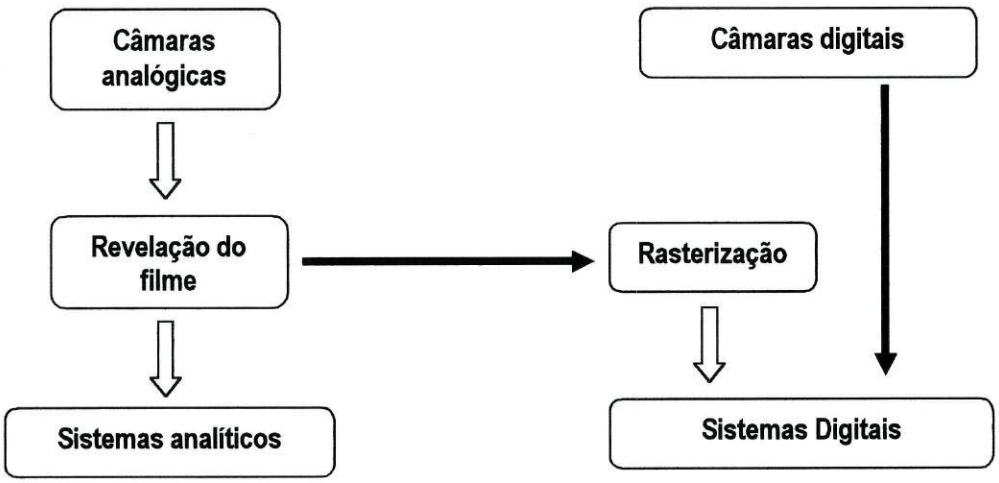


Figura 2.3 – Sistemas de aquisição e extracção de informação utilizados na Fotogrametria terrestre.

As câmaras analógicas têm as suas vantagens, nomeadamente no que diz respeito à qualidade do filme. O saber adquirido ao longo dos anos, relativamente às técnicas de aquisição, é também uma grande vantagem. Relativamente aos processos analíticos de redução de dados, a vantagem prende-se com a grande experiência e conhecimento dos operadores. No que diz respeito ao processo completamente digital, ou seja, desde a aquisição das imagens até à extracção de informação, existem várias vantagens, especialmente porque se torna num processo mais rápido, consistente e produtivo, dado que permite um grau bastante elevado de automatização.

Convém salientar que ainda não existem câmaras digitais que possam ser comparáveis com as analógicas (Grussenmeyer *et al.*, 2002), cuja alta qualidade do filme torna as fotografias de altíssima resolução. Estas fotografias podem ser rasterizadas e entrar assim no processo digital, podendo-se, deste modo, tirar partido das duas situações: a alta resolução da imagem e o processamento digital dos dados. No entanto, o processo de rasterização tem algumas desvantagens: é um processo moroso e implica perda de qualidade das fotografias. O processo digital tem ainda a vantagem de permitir obter medições quase em tempo real, usar sequências de imagens e também conseguir produtos finais bastante mais atraentes. Para além disso, a evolução dos sensores digitais é constante e já se encontram no mercado câmaras digitais amadoras e profissionais com resoluções elevadas e características que permitem o seu uso na Fotogrametria terrestre, depois de devidamente calibradas. O custo deste tipo de câmaras, embora possa ser considerado ainda relativamente alto, tem tendência a descer cada vez mais.

2.3.1.1 CÂMARAS ANALÓGICAS

As câmaras analógicas usadas na Fotogrametria terrestre podem ser divididas em quatro grupos: métricas, estéreo-métricas, semi-métricas e não métricas. As câmaras amadoras e profissionais fazem parte dos dois últimos grupos. Dos dois primeiros grupos fazem parte as câmaras que são especialmente pensadas e construídas para aplicações de Fotogrametria.

As câmaras métricas são caracterizadas por serem construídas com uma geometria interna muito estável. Processos de calibração, em laboratório, tornam conhecida, com grande rigor, a orientação interna da câmara (Apêndice A), que se mantém constante durante longos períodos de tempo. Em Fotogrametria arquitectónica estas câmaras são cada vez menos usadas (Grussenmeyer *et al.*, 2002), dado que, apesar da sua qualidade óptica e geométrica, são dispendiosas e difíceis de manusear.

As câmaras estéreo-métricas foram especialmente criadas para que a geometria de observação do caso normal fosse meticulosamente cumprida: a câmara estéreo-métrica consiste em duas câmaras métricas idênticas, montadas rigidamente numa base de comprimento conhecido, de tal forma que os seus eixos ópticos sejam paralelos um com o outro e perpendiculares ao objecto a fotografar (Figura 2.4).

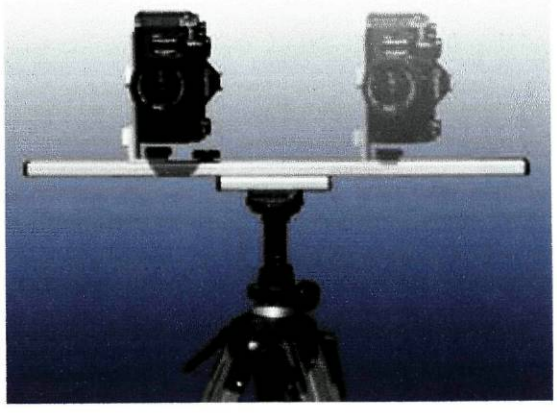


Figura 2.4 – Exemplo de uma câmara estéreo-métrica.

As câmaras semi-métricas apesar de não serem construídas exclusivamente com todas as características das câmaras métricas, possuem a possibilidade de aplicar correcções associadas ao uso de *réseau*. O *réseau* é uma grelha com marcas de referência calibradas, projectadas no filme na altura da exposição, permitindo a compensação matemática de deformações do filme, que ocorrem durante o processo de aquisição, desenvolvimento e processamento das imagens (Grussenmeyer *et al.*, 2002). Exemplos de câmaras semi-métricas incluem a Rolleiflex 6006 e a Leica R5 utilizada no caso de estudo.

Na Tabela 2.4 podem ver-se exemplos de algumas câmaras analógicas - métricas, estéreo-métricas, semi-métricas e não métricas mais utilizadas em Fotogrametria terrestre. Para informações mais detalhadas sobre estas câmaras podem consultar-se vários livros de Fotogrametria (e. g., Atkinson, 1989; Kraus, 1993).

Outra categoria de câmaras que tem vindo a tomar bastante relevância são as câmaras chamadas não-métricas, ou seja, câmaras fotográficas, amadoras e profissionais, que foram pensadas para ter uma boa qualidade de imagem, sem grande preocupação com a qualidade geométrica. Apesar disto e, com alguns cuidados, a utilização deste tipo de câmaras tem mostrado que é possível obter medições precisas (5.8) e a custos relativamente inferiores aos da Fotogrametria convencional. Os critérios necessários para que a precisão seja equivalente ao conseguido com os outros tipos de câmara, passam por uma calibração cuidadosa da mesma (2.3.2). As principais desvantagens que advêm do uso deste tipo de câmaras – instabilidade da geometria interna, falta de marcas fiduciais e mecanismos de orientação e nivelamento da máquina, ficam deste modo colmatadas.

As vantagens das câmaras não-métricas em relação às métricas incluem: fácil disponibilidade, flexibilidade no que diz respeito à capacidade para efectuar *zoom*, são portáteis e leves, podendo ser orientadas em qualquer direcção. Para além disso, o preço destas câmaras é muito inferior ao das câmaras métricas, fazendo parte do vasto grupo de câmaras fotográficas vulgarmente comercializadas.

Tabela 2.4 - Exemplos de câmaras analógicas métricas, estéreo-métricas, semi-métricas e não métricas.

MARCA	MODELO	FORMATO IMAGEM (mm^2)	LENTES (mm)
CÂMARAS MÉTRICAS			
Hasselblad	MK70	60 × 60	60, 100
Wild	P32	65 × 90	64
Wild	P31	100 × 130	45, 100, 200
CÂMARAS ESTÉREO-MÉTRICAS			
Wild	C 40/120	65 × 90	64
Zeiss	SMK 40/120	90 × 120	60
CÂMARAS SEMI-MÉTRICAS			
Rollei	3003	36 ×24	15-100
Leica	R5	36 × 24	18-135
Rollei	6006	60 × 60	40-350
CÂMARAS NÃO MÉTRICAS			
Leica	R8	36 × 24	18-135
Canon	EOS	36 × 24	35

2.3.1.2 *SCANNERS*

Os *scanners* são dispositivos especialmente criados para permitir a passagem de "documentos", nomeadamente diapositivos e filme, do meio analógico para o meio digital. Deste modo, pode dizer-se que os *scanners* são o meio de ligação entre os sistemas de aquisição de fotografia analógicos e os sistemas digitais de extracção de informação, permitindo tomar partido da alta resolução das fotografias analógicas e das grandes vantagens da Fotogrametria digital: arquivo, técnicas de medição automáticas e semi-automáticas, combinação de dados vectoriais e raster, entre outras.

A digitalização de documentos começou no início dos anos setenta, depois de terem sido inventados os foto-sensores denominados CCD (*Charge Couple Devices*). Embora tenham sido desenvolvidos inicialmente como dispositivos de memória, rapidamente serviram para revolucionar os sistemas de aquisição de imagem, uma vez que permitiam obter imagens de uma forma rápida, económica e facilmente transmitida para o computador, utilizando um dispositivo de pequena dimensão, com baixa energia e ruído, e com alta fiabilidade (Shortis *et al.*, 1996).

Os CCD são circuitos integrados de silício, formados por um conjunto linear ou bidimensional (matricial) de células, que vão constituir o sensor presente nos *scanners*. Estes, para além desse sensor, possuem ainda duas componentes básicas: uma fonte de luz e uma lente para focar a imagem do documento no sensor.

Os *scanners* usados em Fotogrametria, nomeadamente em Fotogrametria aérea, precisam de ser construídos com determinadas características de modo a preservar a precisão. Estes *scanners* permitem a digitalização de negativos (filme), utilizando normalmente CCDs em linha ou em área, com uma resolução elevada (5-12,5 μm) e uma alta precisão geométrica (2 a 5 μm), sendo ainda geometricamente estáveis. Para além disso devem permitir uma amplitude radiométrica dinâmica e elevada. Estes *scanners* são aparelhos muito dispendiosos, normalmente ligados a estações fotogramétricas e usualmente adquiridos apenas por instituições dedicadas à produção da informação geográfica.

Surgiu, portanto, a necessidade de encontrar um meio mais económico de digitalização das fotografias, mantendo um padrão de qualidade aceitável. Deste ponto de vista, uma alternativa interessante aos *scanners* fotogramétricos são os chamados *Desktop Publishing* (DTP) que, apesar de serem conhecidos como sistemas de baixa precisão, podem, depois de modulados os seus erros através da calibração, servir para obter imagens para fins fotogramétricos terrestres. No entanto, no que respeita à resolução do *scanner* a situação não é tão linear, dado que, a maioria deles têm resoluções entre 300 e 1600 dpi (*dots per inch*). Estes valores equivalem a um tamanho do pixel de cerca de 87μm e 15μm,

respectivamente. No primeiro caso está fora de questão a sua utilização e no segundo caso só poderá eventualmente ser aceitável para determinadas aplicações que requeiram uma menor precisão. Segundo Pomaska (2001) existem *scanners* DTP para rasterização de negativos de fotografias terrestres com resoluções superiores a 4000 dpi.

A digitalização de imagens tem algumas desvantagens, nomeadamente no que diz respeito ao tempo de execução e, especialmente, no que diz respeito à deterioração da imagem relativamente ao filme original. Para conseguir ultrapassar esta etapa intermédia de ligação entre o meio analógico de aquisição de dados e o meio digital de extracção de informação, desenvolveram-se então câmaras digitais.

2.3.1.3 CÂMARAS DIGITAIS

O desenvolvimento dos sistemas digitais de aquisição de imagem está intimamente ligado ao desenvolvimento dos sensores CCD. São várias as vantagens que advêm do uso de câmaras digitais:

- fluxo directo de dados com possibilidades de processamento on-line;
- boas características geométricas;
- rápida análise e processamento de dados, uma vez que não necessitam do processo de revelação;
- a qualidade das imagens pode ser imediatamente controlada, podendo-se apagar a imagem rapidamente e adquirir outra de imediato;
- sistemas com componentes de baixo preço.

As câmaras digitais têm uma concepção diferente das analógicas. São constituídas basicamente, por um sistema de lentes, um sensor constituído por CCDs, processadores e memória para armazenamento de dados. Estes dispositivos são incorporados em aparelhos compactos, tornando-as muito versáteis e ergonómicas.

As câmaras disponíveis no mercado têm características diferentes relativamente ao tamanho e resolução dos sensores. O tamanho do sensor é definido como o comprimento e altura do sensor em milímetros ou polegadas. Se bem que na literatura se encontre definida a resolução geométrica como sendo a multiplicação do número de pixels horizontais pelo numero de pixels verticais do sensor, ou seja, o número total de pixels (Shortis *et al.*, 1996), convém ressalvar que esta definição é no mínimo imprecisa. Ela depende obviamente do tipo de lentes utilizado e do tamanho do sensor, uma vez que o tamanho do pixel é muito importante. Este facto está patente na Tabela 2.5 onde se verifica que a

câmara com melhor resolução nem sempre é a que tem um maior número de pixels (assume-se que as câmaras têm lentes comparáveis).

A maior parte das câmaras digitais não foram pensadas e fabricadas para fins fotogramétricos, no entanto a comunidade fotogramétrica tem utilizado, entre outras, as câmaras digitais distribuídas pelas empresas Kodak/Nikon com o nome DC40, DCS420 e DCS460, que são, respectivamente, câmaras de baixa, média e alta resolução. Destas câmaras a mais usada é a DCS420, uma vez que a relação resolução-preço é muito equilibrada. Relativamente à DC40 e à DCS460 não existe conhecimento de muitas aplicações, devido à baixa resolução, no primeiro caso e no segundo devido ao elevado preço (Ahmad, 1999). A Tabela 2.5, descreve algumas características de câmaras digitais de baixa, média e alta resolução existentes no mercado.

Tabela 2.5– Exemplos de câmaras digitais de baixa, média e alta resolução

FABRICANTE	MODELO	NÚMERO DE PIXELS H×V	TAMANHO DO SENSOR (mm²)	Tamanho do Pixel (μm)
BAIXA RESOLUÇÃO				
Canon	EOS-DCS 3	1268×1012	20,5×16,4	16
Rollei	ChipPack	2048×2048	31,0×31,0	15
MÉDIA RESOLUÇÃO				
Kodak/Nikon	DC420	1524×1012	14,0×9,0	9,0
Nikon	D100	3008×2000	22,7×15,6	7,5
Kodak/Nikon	DC50	756×504	6,9×4,6	9,1
ALTA RESOLUÇÃO				
Kodak	DCS 290	1800×1200	7,6×4,8	4,2
Fuji	FinePix S2 PRO	4256×2848	23,0×15,5	5,4
Kontron	ProgRes 3000	2994×2320	8,6×6,5	2,8

O uso de câmaras digitais métricas não é tão usual e são poucos os fabricantes que investiram na produção dessas câmaras. Uma das primeiras câmaras métricas digitais foi desenvolvida pela empresa GSI da INCA e possui um sensor com 3072 por 2048 pixels (Mikhail *et al.*, 2001). Mais recentemente, a empresa alemã *Rollei Fototechnic* introduziu no mercado uma câmara digital, Rollei D7 Metric, a qual foi utilizada neste estudo, com focagem e distância focal fixas, um sensor com 5 milhões de pixels e um tamanho para o pixel de 3,4 μm.

2.3.1.4 SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS

Os sistemas fotogramétricos utilizados na arquitectura têm sofrido uma grande evolução ao longo das últimas décadas, acompanhando o desenvolvimento sofrido na Fotogrametria e na Informática. São muito importantes na fase de extracção de informação, para a qual as fotografias, que são uma projecção central, são tratadas para assumir as características de um mapa (projecção ortogonal). O principal objectivo é a reconstrução do modelo tridimensional do objecto fotografado, para se efectuar medições, ser restituído ou simplesmente renderizado.

De acordo com as necessidades específicas da criação de um arquivo arquitectónico ou de registo do património de um modo geral, os diferentes sistemas são baseados quer em procedimentos estereoscópicos quer em procedimentos monoscópicos multi-imagem, sendo muito utilizado neste caso a rectificação digital de imagens (Apêndice B).

a. Sistemas estereoscópicos

Os antigos restituidores analógicos usados na Fotogrametria aérea (Slama, 1980) não eram muito práticos nem versáteis para aplicações de Fotogrametria terrestre, embora tenham sido utilizados para processamento de fotografias métricas e para o caso normal (2.3.3). Fotografias obtidas com câmaras não-métricas não podiam ser usadas, uma vez que estes aparelhos só permitiam a introdução de determinados valores para a distância principal, não aceitando também fotografias obtidas quer com câmaras estéreo-métricas, quer com a maior parte das câmaras métricas.

O aparecimento dos restituidores analíticos veio melhorar o desempenho da Fotogrametria, nomeadamente através da sua maior flexibilidade, precisão, economia e maior velocidade, permitindo também um certo grau de automatização no que diz respeito a cálculos numéricos para, por exemplo, efectuar os processos de orientação. Estes aparelhos estão, no entanto, a ser pouco utilizados na arquitectura, uma vez que, para além do preço ser bastante alto, o desempenho e utilização de sistemas completamente digitais tem vindo a aumentar (Grussenmeyer *et al.*, 2002). Na verdade, o avanço da tecnologia computacional e dos sensores de aquisição de imagem reduziu drasticamente o custo das componentes digitais contribuindo para a transição para o terceiro tipo de sistema fotogramétrico: a estação fotogramétrica digital (EFD). Convém salientar, no entanto, que os custos do *software* dedicado utilizado nas EFD são também elevados, pelo que se torna difícil a utilização destes sistemas pela maior parte das empresas que se dedicam aos levantamentos arquitectónicos.

As estações fotogramétricas digitais utilizam imagens em vez da fotografia em suporte analógico, assegurando assim o acesso ao conteúdo radiométrico, facilitando a extracção de informação através do processamento de imagem e automatização. A produtividade nos trabalhos fotogramétricos foi

bastante beneficiada com estes novos sistemas, uma vez que os sistemas de visualização estereoscópica são ergonómicos e muito mais práticos e a evolução dos monitores e placas gráficas permitem efectuar movimentações ou *zooms* da imagem no monitor, de um modo rápido e eficaz. Para além disso, os algoritmos incorporados nas EFD são muito versáteis permitindo a automatização de variadas tarefas, o que torna os processos menos morosos e repetitivos. A automatização na Fotogrametria terrestre está ainda limitada ao processo de orientação das imagens.

Existem no mercado várias estações fotogramétricas digitais, pensadas originalmente para Fotogrametria aérea, mas que possuem algoritmos dedicados à Fotogrametria terrestre e sendo utilizadas para esse fim. O principal requisito reside no cuidado de tirar as fotografias de forma muito idêntica ao caso normal estereoscópico (Grussenmeyer *el al.*, 2002). Exemplos dessas estações incluem: ImageStation SSK Pro da Z/I (Zeiss – Intergraph), Digital Video Plotter (DVP) e FotoG-FMS da empresa Vexcel.

b. Sistemas monoscópicos convergentes

Os sistemas fotogramétricos multi-imagem são concebidos para manipular duas ou mais fotografias com sobreposição tiradas a partir de ângulos diferentes (Apêndice A) e de forma a cobrir toda a zona de interesse. Estes sistemas processam imagens obtidas com os vários tipos de câmaras (analógicas e digitais, métricas, semi-métricas e não-métricas). As fotografias analógicas têm de ser devidamente rasterizadas por *scanners* e as câmaras não-métricas devidamente calibradas. As medições nestes sistemas são efectuadas separadamente em cada imagem. Estes sistemas foram concebidos para efectuarem uma triangulação multi-imagem convergente, normalmente através do ajustamento por feixes, com a possibilidade de auto calibração da câmara usada. A principal diferença entre os vários sistemas encontra-se nas capacidades do módulo de cálculo em combinar dados adicionais e conhecidos como direcções, distâncias, pontos de controlo e superfícies. Também diferem nas possibilidades de renderização, com diferentes tipos de material ou com as próprias imagens: os ficheiros *raster* são transformados em superfícies do objecto (*object surface*) e a imagem digital é projectada no modelo tridimensional do objecto. Alguns destes sistemas possuem mesmo um módulo de rectificação de imagens.

O *software PhotoModeler* desenvolvido pela empresa canadiana *Eos Systems* é um sistema monoscópico multi-imagem, bem conhecido como sendo um sistema de medição 3D de baixo custo utilizado em aplicações de arquitectura e arqueologia [URL2]. Este *software* foi utilizado no trabalho prático, pelo que as suas características encontram-se descritas posteriormente no capítulo 5.

Este programa inclui um módulo de *software* de calibração de câmaras que permite o uso de câmaras não métricas, sem ter de recorrer a métodos sofisticados de calibração, permitindo assim a obtenção dos parâmetros físicos da câmara necessários à orientação interna, para aumento da precisão do sistema.

Existem ainda outros sistemas baseados no mesmo conceito, por exemplo:

- 3D BUILDER PRO [URL3], com um *software* de modelação baseado em condições
- KODAK Digital Science Dimension [URL4], com capacidade de processamento de uma só imagem ou de multi-imagens,
- CANOMA [URL5] é um *software* especialmente pensado para criar modelos 3D fotorealísticos a partir de ilustrações (material histórico, arte, imagens ou fotografias rasterizadas, etc..

2.3.1.5 PONTOS DE CONTROLO

O controlo da informação obtida por processos estereoscópicos e monoscópicos, continua a ser um pré-requisito na Fotogrametria arquitectónica. A geo-referenciação da informação tem sido feita usando uma série de técnicas, que vão desde a inclusão de uma simples medida de distância (unidimensional) até ao uso de soluções altamente sofisticadas de ajustamento por feixes, onde é necessário obter coordenadas de vários pontos, chamados de controlo, bem definidos no objecto (2.3.3). De um modo geral, qualquer técnica é válida desde que assegure que a precisão definida é atingida e que são evitados erros grosseiros. Embora nos primeiros anos da Fotogrametria arquitectónica moderna, a aquisição de pontos de controlo fosse um processo moroso e trabalhoso, com o aparecimento das estações totais tornou-se muito mais rápido, aumentando também a confiança no processo (Dallas, 1996).

A estação total é, portanto, um instrumento importante nos projectos de Fotogrametria terrestre porque possibilita o levantamento de pontos de controlo necessários à realização de projectos de Fotogrametria arquitectónica. É um instrumento que faz parte do domínio da Topografia – ciência que tem como finalidade a recolha e tratamento de dados geográficos para o posicionamento planimétrico (X,Y) e altimétrico (Z) dos acidentes naturais ou artificiais existentes sobre a superfície da Terra. A recolha de dados é feita por aparelhos especificamente concebidos para o efeito, permitindo a medição de ângulos (horizontal e vertical) e, mais recentemente, de distâncias. Os dados observados são transformados em coordenadas utilizando fórmulas matemáticas perfeitamente estabelecidas e recorrendo a *software* dedicado. O equipamento disponível e os métodos aplicados para a medição,

gravação, cálculo e compilação dos dados têm sofrido grandes alterações nas últimas décadas, especialmente com o desenvolvimento do microprocessador.

O princípio básico da medição de distância por meios electro-ópticos consiste na determinação indirecta do tempo que um sinal emitido pelo aparelho demora a percorrer o caminho entre duas estações: o aparelho estacionado num ponto estação emite um feixe de luz modulado para um reflector (prisma) que está parado no outro ponto estação, que o reenvia para o aparelho, onde é feita uma comparação de fase entre os pulsos emitidos e reflectidos. A velocidade da luz é a base para o cálculo da distância.

A medição de distância com estes aparelhos pressupõe portanto, a colocação de um alvo no ponto ao qual se quer conhecer a distância. Este facto limita o trabalho relativo à Fotogrametria terrestre, uma vez que, especialmente em aplicações arquitecturais, não é possível colocar o prisma nos pontos de interesse. Para ultrapassar este problema da medição de distância pode recorrer-se a métodos especiais de levantamento e cálculo, nomeadamente o método de intersecção directa (Xerez, 1969), que embora bastante moroso soluciona o problema. Outro modo, bastante recente, de ultrapassar aquela limitação, é o uso de estações totais laser. Estas permitem a medição de distâncias sem necessidade da utilização de um prisma reflector, pelos métodos normais de medição de distâncias, sem ser preciso recorrer a métodos mais morosos e menos práticos.

A precisão angular das estações totais, mais comuns, pode ir deste os 7 segundos de arco até aos 0,5 segundos de arco. Relativamente à precisão na medição da distância pode ir desde os 10 cm $\pm$ 50 ppm a 1 mm $\pm$ 2 ppm.

2.3.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS

A calibração de câmaras fotográficas terrestres pode ser entendida como sendo um procedimento que permite determinar um conjunto de parâmetros inerentes à câmara, os quais permitem a reconstituição do feixe de luz que deu origem à fotografia/imagem. Este processo é importante dado que as câmaras, quer sejam métricas ou não, não possuem um sistema de lentes perfeito, sofrendo diversas aberrações, que têm de ser modeladas para que a sua intervenção na degradação da qualidade pictorial e geométrica da imagem seja o menor possível. Na realidade, devido a estas aberrações, a fotografia/imagem não é uma projecção central perfeita.

A calibração de câmaras pode ter vários objectivos (Ziemann and El-Hakim, 1982) como, por exemplo:

- avaliação do desempenho do sistema de lentes;
- avaliação da estabilidade do sistema de lentes;
- determinação dos parâmetros ópticos e geométrico das lentes;
- determinação dos parâmetros ópticos e geométricos do sistema lente-câmara; ou
- determinação dos parâmetros ópticos e geométricos de um sistema de aquisição de dados de imagem.

Orientação interna (Apêndice A) é o termo utilizado pelos fotogrametristas para descrever a geometria interna do sistema composto pela câmara e lentes e cujos parâmetros são determinados pela calibração. São eles: a distância principal, as coordenadas fotográficas do ponto principal e os valores de distorção radial e tangencial das lentes (Apêndice A).

Os métodos usados para a calibração das câmaras fotográficas terrestres não se encontram tão padronizados como para as câmaras aéreas, tendo havido contudo uma evolução significativa nesta matéria ao longo das últimas décadas. Os métodos de calibração de câmaras terrestres começaram por ser uma cópia dos usados para as câmaras aéreas, cuja aplicação era essencialmente a fotografia estereoscópica vertical passando depois a técnicas que usam as condições favoráveis da geometria convergente para obter os parâmetros da orientação interna e da distorção das lentes (Fryer, 1996). Em 1989, Fryer defendia que um dos modos preferenciais para executar a calibração deveria ser em laboratório. No entanto em 1996, argumenta que a construção de laboratórios de calibração altamente especializados para a criação de testes contendo cem ou mais alvos, cujas coordenadas são meticulosamente obtidas às décimas de milímetro por intersecções com um teodolito (Xerez, 1969), é um método pouco prático, dispendioso e que deixou de fazer sentido na maior parte das organizações dedicadas à Fotogrametria terrestre. Deste modo, tornou-se um método em desuso e ultrapassado pelos métodos chamados *on-the-job* e auto calibração. Estes métodos são muito utilizados porque são em geral pouco dispendiosos (Fryer, 1996).

O termo calibração *on-the-job* é dado à técnica utilizada para determinar os parâmetros das lentes e a calibração da câmara *in situ*, ou seja, ao mesmo tempo que se processam as fotografias para criar o modelo 3D do objecto em estudo. Este método é particularmente apropriado para câmaras não-métricas, uma vez que os parâmetros da orientação interna são determinados na mesma solução que as outras incógnitas no processo de orientação externa. A solução é normalmente baseada num número suficientemente grande de pontos de controlo, os quais são obtidos pelo uso de uma estrutura tridimensional construída, por exemplo, em alumínio, com dimensões de cerca de dois metros cúbicos e onde são colocados alvos cujas coordenadas são conhecidas. Esta estrutura é colocada em frente ao

objecto de estudo antes de se efectuar a aquisição das fotografias. Idealmente as dimensões do objecto de estudo seriam pequenas. Para objectos muito grandes é complicado criar estruturas 3D que ocupem toda a frente do edifício, pelo que, vários investigadores idealizaram um conjunto de estruturas composto por bastões e suportes, que podem ser simplesmente montados e colocados no campo de visão. Estas estruturas são "espalhadas" ao longo de todo o objecto. A necessidade de pontos de controlo cujas coordenadas são conhecidas com precisão e da colocação das estruturas 3D ao longo do objecto torna este método dispendioso e por vezes inconveniente.

Um dos métodos de calibração de câmaras mais recentemente difundido baseia-se na utilização de grelhas de padrões planos, que pode ser constituído por quadrados brancos e pretos ou triângulos brancos e pretos, ou seja, um padrão facilmente identificável. Os pontos de intersecção entre os quadrados pretos e brancos são considerados pontos de calibração. São adquiridas, no mínimo, oito fotografias convergentes a partir de posições diferentes e algumas delas com a câmara rodada de 90°. A medição das coordenadas imagem dos pontos de calibração nas várias imagens é executada por técnicas de *Template Matching* e o conjunto de parâmetros de calibração é calculado pelo método de ajustamento por feixes. Este foi o método de calibração utilizado (5.4.1).

2.3.3 PLANEAMENTO PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS

O planeamento para a aquisição de dados em Fotogrametria terrestre é uma das fases mais importantes de todo o processo, sendo a base para a criação do modelo fotogramétrico e arquivo arquitectónico, condicionando bastante a precisão e exactidão obtida no trabalho final. Ele consiste na determinação de um certo número de parâmetros, como por exemplo, a escala (m_b), a base (B), a distância ao objecto (Y), a sobreposição das fotografias (S) e a largura do modelo (LM). Estes parâmetros servem para obter um plano fotográfico, desenhado sobre uma planta topográfica, de preferência actualizada, da região em causa. Este plano contém a localização e distribuição das posições onde deve ser colocada a câmara fotográfica para a aquisição das fotografias. Para além do planeamento para a aquisição das fotografias, é importante o planeamento para a aquisição dos pontos de controlo, passando essencialmente pela análise das fotografias onde aparecem para garantir a sua perfeita visibilidade, por uma distribuição homogénea ao longo de todo o modelo e pela realização de um croqui do ponto de controlo com o respectivo número de identificação.

2.3.3.1 FOTOGRAFIA/IMAGEM

O planeamento para a aquisição de fotografias para a Fotogrametria terrestre está dependente, em primeiro lugar, da escala pretendida para o produto final, que condiciona consideravelmente o planeamento fotográfico. Este tem de ser devidamente estabelecido tendo em conta as posições mais favoráveis para a câmara dentro do espaço onde pode ser colocada e tendo em consideração as obstruções existentes. Estes detalhes determinam grandemente o ângulo de campo das lentes. Grandes distâncias da câmara ao objecto requerem o uso de grandes distâncias focais enquanto que para distâncias pequenas o mais usual é recorrer a câmaras de grande angular (Kraus, 1993). Para além disso, dependendo do método que vai ser utilizado para a criação do arquivo arquitectónico – método estereoscópico ou monoscópico convergente multi-imagem – assim o planeamento para a aquisição tem de ser feito de maneira diferente, conforme a breve descrição que se segue.

a. Método estereoscópico

O planeamento do levantamento fotográfico relativamente a este método está muito bem estabelecido e documentado. Segundo Karara (1980 a) existem três possíveis situações para este método: o chamado "caso normal", a fotografia paralela oblíqua e a fotografia estereoscópica convergente. Será referido apenas o "caso normal" por ser o utilizado no trabalho efectuado. Para informações sobre os restantes ver, por exemplo, Slama (1980).

O método mais utilizado e standarizado é o "caso normal" que, como se pode ver na Figura 2.5, consiste em colocar duas câmaras em frente ao objecto, de tal forma que os seus eixos sejam paralelos um ao outro e perpendiculares à linha de base (B).

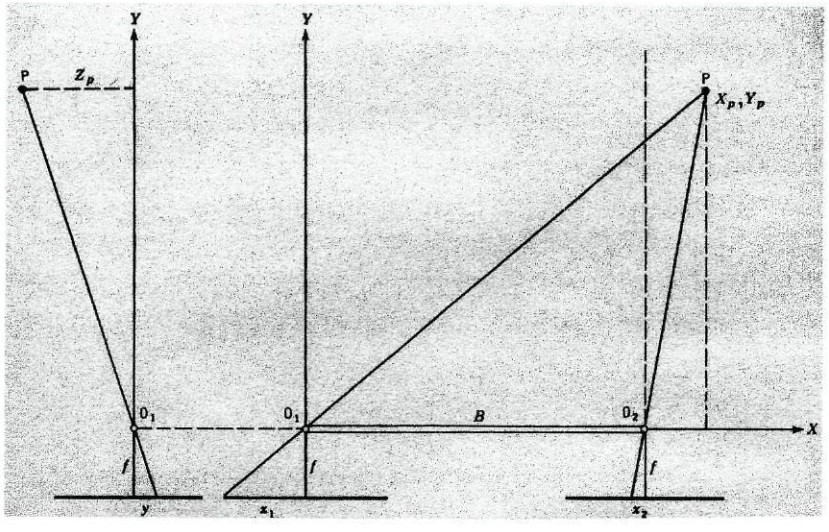


Figura 2.5 – O "caso normal" na Fotogrametria terrestre (Kraus, 1993).

Segundo Karara (1980) o comprimento da base é normalmente escolhido de forma a satisfazer a condição:

$$\frac{Y_{max}}{20} < B < \frac{Y_{min}}{5} \tag{2.1}$$

sendo Y_{max} e Y_{min} as distâncias respectivamente máxima e mínima entre a câmara e o objecto.

Outros autores defendem que, para garantir bons resultados, a razão entre a base e a distância câmara-objecto deve estar entre 1:5 e 1:15 (Grussenmeyer *et al.*, 2002).

Na Figura 2.6 pode ver-se a cobertura estereoscópica de um par obtido com fotografias obedecendo ao caso normal. O diagrama mostra claramente a relação entre a base (B), a distância câmara-objecto (distância ao objecto -Y), a largura do objecto (L), a distância focal (c) e a largura da imagem (entre os cantos) (s). A equação (2.2) traduz esta relação, tendo em consideração uma margem de segurança de 5 mm para cada canto das fotografias.

$$\frac{s-10mm}{c} = \frac{B+L}{Y} \tag{2.2}$$

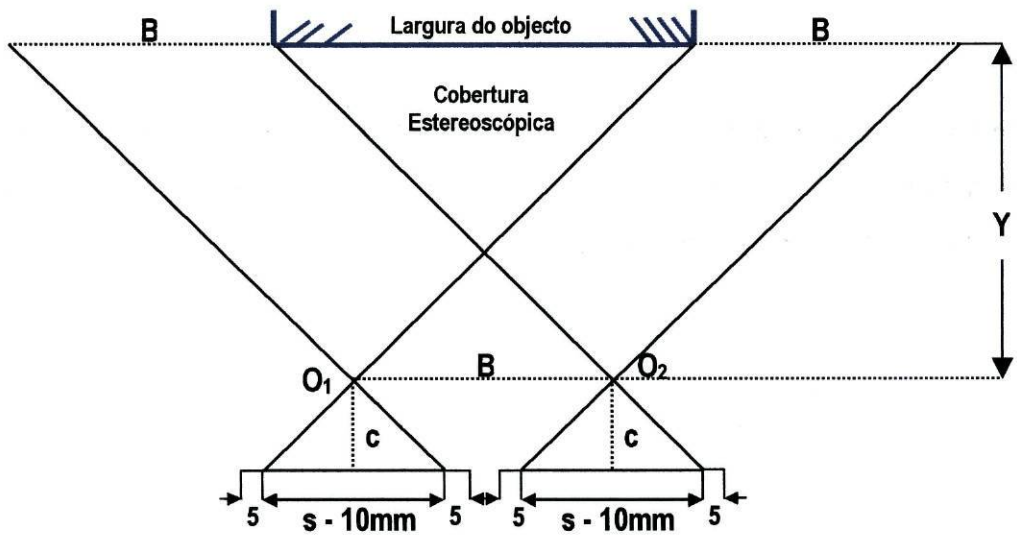


Figura 2.6 – Planeamento da aquisição de fotografias pelo "caso normal" (Adaptada de Kraus, 1993).

A sobreposição e largura do modelo são calculadas pelas equações 2.3 e 2.4, respectivamente.

$$S = \frac{Y.\left(\frac{s}{c}\right) - B}{Y.\left(\frac{s}{c}\right)}.100 \tag{2.3}$$

$$LM = Y.\frac{s}{c} - B \qquad (2.4)$$

As fotografias podem ser adquiridas como simples pares estereoscópicos ou como fiadas de modelos com sobreposição, semelhante ao que acontece na fotografia aérea. No entanto, devido à natureza dos edifícios e da sua envolvente, não é muito usual a existência de fiadas muito longas, bastando apenas alguns modelos para que a cobertura da fachada fique completa.

Segundo Kraus (1993) quanto maior for a precisão requerida maior tem de ser a razão entre a base e a distância câmara-objecto, ou seja, para uma dada base, a precisão melhora com a diminuição da distância Y.

No respeitante à relação entre a escala da fotografia e a escala da restituição o factor de ampliação não deverá exceder um valor entre 6 e 8 vezes (Kraus 1993). Segundo Mills *et al.* (2000) o factor de ampliação deverá estar compreendido entre 4 e 6 vezes. Também Dallas (1996) reforça a ideia de que um factor de ampliação de 6 vezes é suficiente, salientando, no entanto, que para determinados objectos, um factor de ampliação de 3 vezes pode não ser suficiente.

Um dos problemas encontrado frequentemente na aquisição das fotografias diz respeito ao facto da cobertura fotográfica do objecto poder estar incompleta devido à presença de obstruções, por exemplo, vegetação, veículos ou outros edifícios. As áreas que faltam são, normalmente, levantadas manualmente ou com a ajuda de uma estação total. Nesta fase deve ter-se também em consideração as características de certos elementos que possam apresentar dificuldades na fase de desenho, por exemplo, no caso de colunas ou torres, circulares ou quadradas, não existe possibilidade de mostrar ambos os lados num único par estereoscópico, por isso têm de ser adquiridas mais fotografias, para que, na fase de desenho seja possível conjugar os vários desenhos e completar assim o objecto (Dallas, 1980).

b. Método monoscópico convergente multi-imagem

O planeamento e aquisição de fotografias para a criação do arquivo arquitectónico usando sistemas fotogramétricos convergentes multi-imagem requer cuidados diferentes dos necessários para o método anterior. Em geral, são obtidas duas ou mais fotografias com alguma sobreposição, obtidas de diferentes ângulos (Apêndice A), de tal modo que sejam cumpridas as seguintes directrizes, tendo em conta a obtenção de um produto final com uma boa precisão:

- Obter fotografias cujos ângulos de aquisição entre as várias estações fotográficas sejam muito próximos de 90°, ou seja, com uma boa separação angular;

- Obter pelo menos três fotografias/imagens;
- Garantir que todo o pormenor de interesse seja visível em pelo menos três fotografias/imagens;
- Obter o máximo de sobreposição possível entre fotografias/imagens adjacentes.

A obtenção de pelo menos três fotografias prende-se com o facto de que, apesar de com duas fotografias apenas, se conseguir calcular as coordenadas objecto do ponto, se numa das imagens o ponto em causa estiver medido com imprecisão, as suas coordenadas serão também imprecisas. A terceira imagem serve, então, para compensar algumas imprecisões na medição do ponto aumentando também a redundância no método dos mínimos quadrados e por conseguinte, a precisão. Estas fotografias devem ser obtidas de forma a que todos os pontos sejam visíveis nas três fotografias, obtendo uma de frente ao objecto, outra do lado direito e outra do lado esquerdo, tentando que estas últimas tenham uma separação angular próxima dos 90° (Figura 2.7). Na Figura 2.8 pode ver-se o porquê da necessidade de se adquirirem fotografias com esses ângulos – quanto mais próximos os raios de luz estiverem do ângulo recto, menor será a possibilidade de erro no cálculo das coordenadas tridimensionais. Na Figura 2.8a) pode ver-se a localização correcta de um dado ponto e a localização errada, pela introdução de um pequeno erro na localização do ponto; na Figura 2.8b) as coordenadas do ponto são obtidas com maior imprecisão, quando introduzido o mesmo erro, devido aos raios de luz formarem ângulos muito agudos.

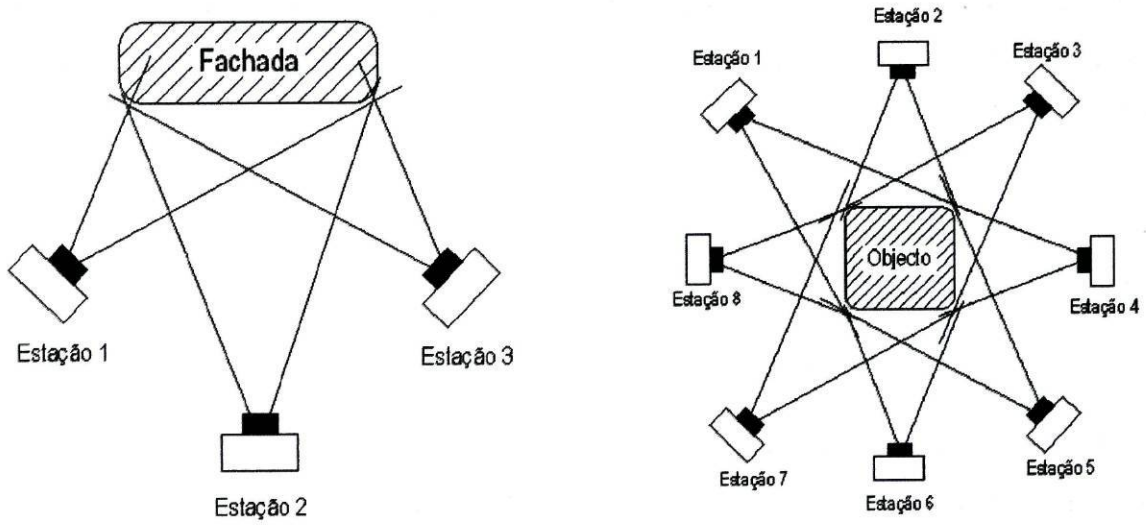


Figura 2.7 – Posição "ideal" das câmaras fotográficas para a cobertura de uma fachada e de um objecto com a forma de um cubo.

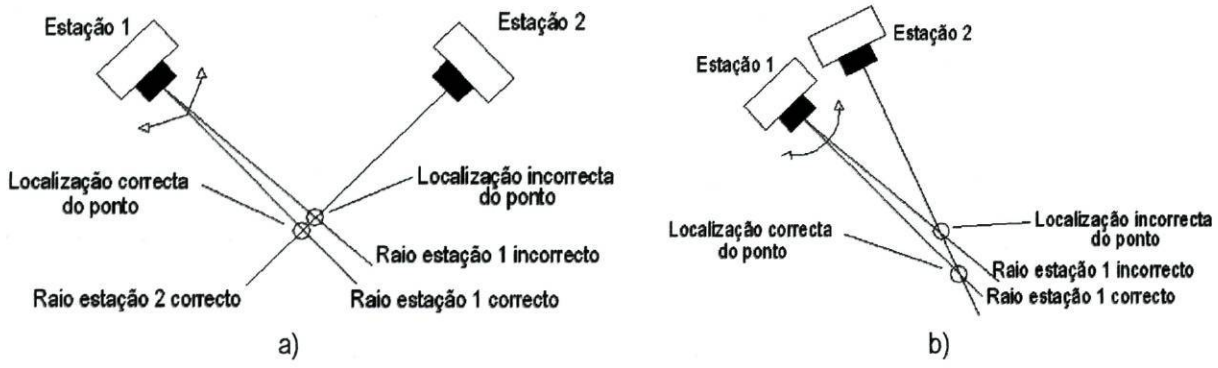


Figura 2.8 – Erro associado às posições da câmara: a) posição da câmara em estações colocadas perto do ângulo recto; b) posição da câmara em estações com pouca separação angular.

Todos estes factores referidos anteriormente têm de ser tidos em atenção sempre que se efectua a cobertura fotográfica de qualquer objecto, cuja configuração vai depender fortemente da forma do objecto em causa.

Para estabelecer algumas regras gerais empíricas de planeamento de projectos de Fotogrametria monoscópica convergente multi-imagem foram realizados um grande número de simulações que entram em consideração com a forma do objecto, com a disposição dos pontos de controlo, com o posicionamento da câmara e com o tipo de câmara. Apresentam-se, de seguida, apenas alguns exemplos das situações ideais que poderão, dentro do possível, transpor-se para projectos concretos.

A Figura 2.9 mostra as posições da câmara para o caso de um objecto semelhante a uma torre, ou seja, um objecto alto, onde algumas fotografias teriam de ser adquiridas recorrendo a gruas ou elevadores hidráulicos (Kraus, 1997).

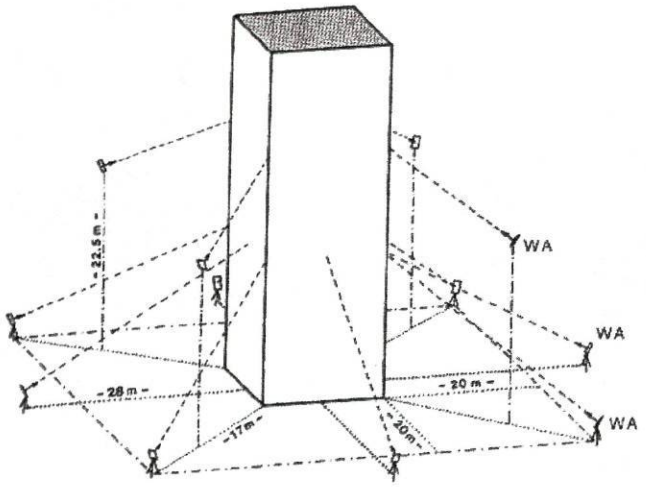


Figura 2.9 - Posições ideais da câmara para cobertura fotográfica de uma "torre" (Kraus, 1997).

Convém salientar que os resultados obtidos utilizando estas regras empíricas são apenas aproximações dos resultados em casos reais. Se a forma do objecto a fotografar, a disposição da câmara e dos pontos de controlo diferir destes casos estudados, a estimativa a *priori* da precisão será uma incerteza, tanto maior quanto maior for a diferença entre o simulado e o real. Deve-se, no entanto, efectuar simulações, projecto a projecto tendo em atenção a forma do objecto, variar a disposição da câmara e dos pontos de controlo até que se atinja a precisão requerida (Kraus, 1997). Este facto implica um primeiro processamento das fotografias para verificar se, por exemplo, os ângulos de intersecção são próximos de 90°.

2.3.3.2 PONTOS DE CONTROLO

Pontos de controlo fotogramétrico são pontos cujas posições são conhecidas no sistema de coordenadas do espaço objecto e cujas imagens podem ser bem identificadas nas fotografias, permitindo, assim, o estabelecimento dessas coordenadas para qualquer ponto do objecto. As suas posições devem ser medidas cuidadosamente uma vez que a precisão do resultado final será sempre inferior à precisão dos pontos de controlo. A obtenção de coordenadas é feita, como já foi aliás referido em 2.3.1.5, recorrendo a teodolitos ou estações totais aplicando o método de intersecção directa ou, mais recentemente, através de estações totais com distanciómetro laser.

Os pontos de controlo podem ser pontos naturais ou artificiais. O principal requerimento dos pontos naturais é estarem em posições favoráveis, terem imagens bem distintas e serem facilmente colimados com a estação total. Exemplos de pontos naturais, em edifícios, podem ser os cantos dos caixilhos das janelas, vértices de pormenor existente nas fachadas (e. g. cruzes, ornamentos e decoração), vértices de pilares existentes e pormenores das pedras, se existirem. Os pontos de controlo artificiais são alvos desenhados especificamente para essa função e colocados no objecto antes da aquisição das fotografias. A concepção destes alvos tem de ser feita tendo em conta a sua boa visibilidade e distinção na imagem, pelo que o seu tamanho e forma têm de ser considerados cuidadosamente. São várias as formas que os alvos podem ter, sendo as formas circular e quadrada preferidas pela maior parte dos utilizadores. Os alvos circulares têm sido usados exaustivamente em projectos de grande precisão (Karara, 1980 a). Relativamente ao tamanho do alvo, os aspectos a ter em atenção são a geometria e a escala da fotografia, para que os alvos sejam visíveis em condições óptimas. Existem, hoje em dia, alvos que são constituídos por um material muito fino e plano, com uma cor acinzentada que é retro-reflector. Estes alvos reflectem a luz incidente de uma maneira muito mais eficiente do que os alvos brancos convencionais, ficando facilitada a sua identificação na imagem.

No "caso normal" o tamanho do alvo (diâmetro do alvo circular ou lado do alvo quadrado) pode ser estimado da seguinte maneira: sabendo a distância câmara-objecto, e sabendo a distância focal da câmara, sabe-se a escala da fotografia para o ponto a ser fotografado. Com esta informação pode-se determinar o tamanho aparente da marca (no interior do alvo) a medir (Figura 2.10). O diâmetro aparente do alvo circular deve ser, pelo menos, 5/3 do tamanho do diâmetro aparente da marca (Karara, 1980 a). No caso da Fotogrametria digital o tamanho da marca dos alvos, para que as medições sejam feitas com precisão, é de pelo menos, 3×3 pixels.

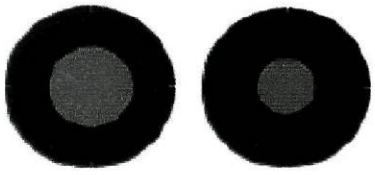


Figura 2.10 - Exemplos de alvos retro-reflectores com marca.

Uma regra empírica para calcular o tamanho dos alvos é ter em consideração a largura do objecto ou das secções que se vão medir e considerar que o alvo é 1/1000 desse tamanho, ou um milímetro por metro. Por exemplo, se o objecto tem 3m de largura, então a marca do alvo tem, no mínimo, 3mm de diâmetro.

Esta regra é válida também para o caso do método convergente multi-imagem, embora a determinação do tamanho do alvo não seja tão linear como para o "caso normal". Tal deve-se ao facto de, a partir de determinado ângulo de observação, os alvos aparecerem distorcidos, com distorções que dependem dos ângulos de observação. Para além disso, no caso dos alvos retro-reflectores, a energia reflectida não tem a mesma intensidade quando as fotografias são obtidas de um dado ângulo, podendo mesmo ser impossível a sua medição.

Os outros aspectos fundamentais a ter em conta aquando do planeamento dos pontos de controlo diz respeito ao seu número e sua distribuição no objecto. A precisão final depende fortemente destes dois factores. No que diz respeito ao número de pontos de controlo, serão necessários pelo menos três pontos para o "caso normal" e por modelo. É conveniente que se use um número superior para se poder utilizar o método dos mínimos quadrados, servindo também para verificação. No caso da orientação de vários modelos, a distribuição e número de pontos de controle necessários seguem as regras existentes para a Fotogrametria aérea (Karara, 1980 b)

De um modo geral, à excepção da orientação de um só modelo ou fotografia, os pontos de controlo devem encontrar-se bem distribuídos pelos cantos e centro do modelo no método estereoscópico e no caso do método monoscópico convergente devem estar distribuídos de forma a circundarem o objecto evitando assim a extrapolação e devem, tanto quanto possível, cobrir homogeneamente todo o objecto. É também importante ter o cuidado de escolher pontos a diferentes profundidades para que a solução

não se torne indeterminada (Karara, 1980). Ou seja, que o controlo esteja distribuído de tal forma que envolva o objecto nas três dimensões.

A quantidade necessária de pontos de controlo está directamente relacionada com o número de incógnitas introduzido no processamento de dados (e.g. determinação dos parâmetros da câmara).

Para o exemplo do cubo mencionado na secção anterior (Figura 2.11a), a melhor distribuição para os pontos de controlo e com o método monoscópico, é um ponto de controlo em cada um dos vértices, ou seja, oito pontos de controlo. Para o caso da torre (Figura 2.11b), se a disposição e número de pontos de controlo forem os mesmos que para o cubo, a solução ficaria pouco robusta, pelo que seria necessário observar mais pontos de controlo a meio da torre.

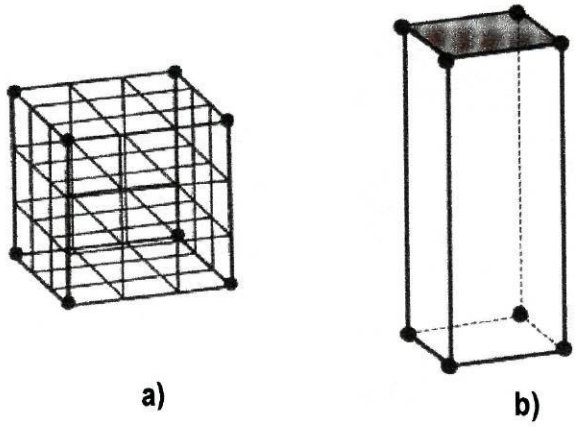


Figura 2.11 – Distribuição e número de pontos de controlo: a) caso de um cubo; b) caso de uma torre.

Para mais pormenores sobre este assunto ver Kraus (1997).

2.4 VARRIMENTO LASER TERRESTRE 3D

O varrimento laser é uma técnica que apenas recentemente tem vindo a ser utilizada em levantamentos terrestres, nomeadamente, na industria, na arquitectura e no registo do património. Para efectuar o varrimento do objecto são utilizados instrumentos designados laser *scanners*, ligados a *softwares* dedicados, que permitem a reconstrução tridimensional de objectos de uma forma completa e densa, possibilitando a rápida criação de arquivos arquitectónicos.

O facto de permitir a obtenção de um grande conjunto de dados, num curto período de tempo, com uma precisão relativamente elevada despertou o interesse dos produtores de informação que começaram a utilizar a técnica, efectuando diversos testes para terem garantias de que o padrão de qualidade e precisão da Fotogrametria arquitectural sejam mantidos. Apesar de todas as vantagens

encontradas na utilização desta técnica é necessário ter algumas reservas, uma vez que a pesquisa ainda se encontra a decorrer e existem alguns problemas que não estão completamente resolvidos, nomeadamente no que diz respeito à georeferenciação e à junção de diferentes conjuntos de dados, contíguos, obtidos para cobrir uma mesma fachada (Bornaz *et al.*, 2002). Outro problema diz respeito à qualidade do próprio levantamento com o laser *scanner*, uma vez que depende de vários factores acidentais que condicionam a propagação do feixe laser e que não são facilmente previsíveis. Para além disso, o retorno do sinal está também dependente da superfície reflectora, que se for muito rugosa, pode causar degradação na qualidade dos dados, uma vez que reflecte em várias direcções perdendo intensidade de retorno (Fangi *et al.*, 2001).

O sistema de varrimento laser grava as coordenadas tridimensionais de cada ponto do objecto, podendo, deste modo, obter-se centenas ou milhões de pontos, sendo visível uma nuvem de pontos a cobrir o objecto. Para que isto seja possível o *scanner* emite um feixe laser em direcção ao objecto que o reflecte de volta para o *scanner*. O princípio de medição prende-se com o cálculo da distância que o feixe percorre desde o *scanner* até ao objecto e o seu retorno, que pode ser determinado através do tempo decorrido entre a emissão do pulso laser e a detecção do retorno ou através de métodos de triangulação. Os *scanners* são denominados *ranging* ou *triangulation scanners* consoante operam do primeiro ou segundo modo, respectivamente.

Com a nuvem de pontos é possível a criação de uma malha através da triangulação, que pode depois ser renderizada com uma determinada textura ou com fotografias, dando um aspecto real do objecto, agora reconstruído tridimensionalmente. A partir dos dados obtidos é possível obter também o desenho das fachadas em modo vectorial (alçados).

O varrimento é conseguido, em geral, através de um ou dois espelhos que rodam, permitindo assim alterar o ângulo de varrimento. O registo preciso dos ângulos estabelecidos é importante uma vez que a posição do ponto registada pelo *scanner* (reflectida) está dependente das medições dos ângulos e da distância.

Existem diferentes instrumentos utilizados para efectuar o varrimento do objecto variando nos métodos de operação e nas especificações técnicas (precisão, velocidade de medição e amplitude de medição angular e linear, etc.).

Existem sensores de varrimento laser que, para além da medição de distâncias, registam também a intensidade dos sinais retornados, sendo possível criar uma imagem de intensidade (medição activa). Mais recentemente apareceram aqueles que fornecem informação sobre a cor das superfícies observadas (Figura 2.12). Isto é conseguido através de uma medição activa (usando 3 lasers- um

vermelho, um azul e um verde (Gonzo *et al.*, 2001)) ou passivamente através de uma câmara digital com um campo instantâneo de visão semelhante ao do feixe laser, necessitando de energia vinda do sol ou de uma fonte artificial de luz (Figura 2.12c). Na Figura 2.12a) e 2.12b) podem ainda visualizar-se uma imagem a falsa cor obtida por codificação do valor da distância com sobreposição da imagem de intensidade e uma imagem resultante do registo da intensidade de retorno do sinal, respectivamente.

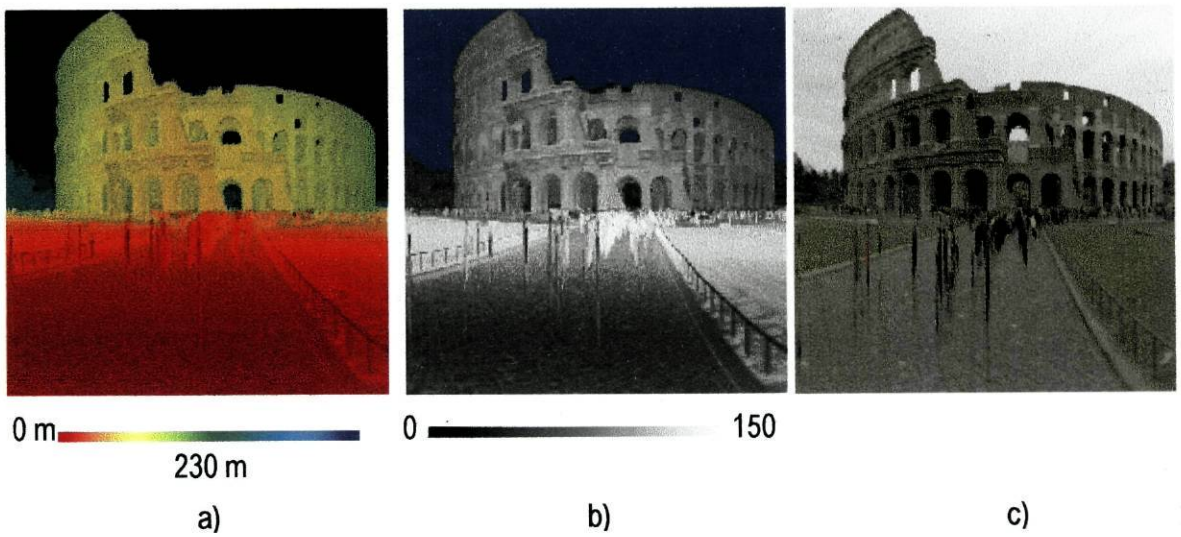


Figura 2.12 – Imagens do Coliseu de Roma obtidas a partir dos dados 3D adquiridos por laser *scanner* (URL6).

Os laser *scanners* podem ser usados de um modo estático – colocados numa posição fixa (e. g., em linhas de produção para controlo de qualidade) ou como sistemas móveis colocados em tripés ou dispositivos semelhantes, para aplicações terrestres. Ao instrumento está sempre ligado um computador com o *software* dedicado que lhe permite, entre outras coisas, configurar os ângulos de varrimento na horizontal e vertical e também a área do objecto a ser varrida.

Nestes últimos anos surgiram no mercado uma diversidade de laser scanners com o objectivo de servirem para as mais diversas aplicações e os mais diversos utilizadores. Os primeiros scanners tiveram como principal alvo o varrimento, levantamento e modelação de pequenos objectos com tamanho que vão desde moedas a carros, estando bem adaptados para o registo de objectos pertencentes ao património cultural (esculturas, estátuas, etc.). O princípio da triangulação em que se baseiam garante uma grande precisão a distâncias inferiores a dois metros e também uma alta resolução para objectos pequenos e cheios de detalhes.

Os *scanners* disponíveis para levantamento de grandes objectos existem em número muito menor. Devido à perda de precisão dos scanners de triangulação com o aumento da distância, a maior parte deles são *ranging scanners*. Naturalmente que se deve ter sempre em atenção a distância uma vez

que a resolução diminui com o seu aumento pois o tamanho da área reflectida aumenta com a distância.

Algumas empresas encontram-se presentemente a desenvolver novos sistemas. Pode ser encontrada em URL7 (2003) uma lista de *scanners*, constantemente actualizada, bem como variadas ligações aos sites dos produtores.

3

MODELOS TRIDIMENSIONAIS URBANOS

Os modelos tridimensionais (3D) urbanos pretendem ser a representação tridimensional do ambiente urbano, como uma parte do ambiente geral, constituída por edifícios e estruturas construídas pelo Homem, em oposição ao campo e mundo natural. Um modelo 3D urbano consiste no modelo digital equivalente a uma cidade real, onde tem lugar a representação dos edifícios, passeios, outro tipo de estruturas aí existentes, assim como árvores e jardins. Deste modo, espera-se que os modelos 3D permitam o apelo à compreensão instintiva dos utilizadores e melhorem radicalmente a capacidade destes visualizarem determinados fenómenos e modificações que possam ocorrer na cidade. Para que estes modelos permitam transmitir a sensação de estar presente num dado local, é em geral necessário adicionar à reconstrução geométrica dos modelos um nível de detalhe suficientemente realístico e, se possível, outra diversidade de serviços, funções e informação. Deste modo, a parte geométrica dos modelos 3D urbanos tem de ser integrada com técnicas de visualização e animação, entre outras, dando lugar a um modelo 3D urbano que represente o mais fielmente possível a realidade e/ou futuras realidades e sobre o qual é possível "navegar". A Figura 3.1 mostra um pormenor do modelo 3D da cidade de Los Angeles, onde pode ser visto um certo grau de detalhe que o torna bastante real.



Figura 3.1 – Extracto do modelo 3D da cidade de Los Angeles (Batty *et al.*, 1998).

A modelação do ambiente urbano não é uma tarefa fácil, uma vez que as cidades, vizinhanças e regiões são fenómenos muito complexos. Cada cidade é um sistema complexo do ponto de vista funcional e também visual, uma vez que ela reflecte todas as mudanças, quer históricas, culturais, económicas e sociais ocorridas ao longo do tempo. Analisando fotografias de grandes cidades como Lisboa estas revelam uma imensa diversidade de tipo de ruas, edifícios, formas e texturas.

Estes cenários urbanos tridimensionais são, por excelência, um grande desafio para os sistemas de visualização interactiva, uma vez que a sua complexidade, a possibilidade dada ao utilizador de variar as perspectivas de visibilidade do pormenor, o acréscimo de fotorealismo a partir de imagens de alta qualidade das fachadas dos edifícios e das zonas arborizadas ou coberto vegetal, até à fotografia aérea para atribuição de textura ao modelo digital de terreno, colocam um sem número de constrangimentos à capacidade do *hardware* existente (Pimentel *et al.*, 2000). Assim, a modelação e visualização 3D de grandes cidades só é possível graças à evolução da informática na medida em que proporcionou grande capacidade de memória para os computadores e um poder gráfico e de processamento nunca antes atingido.

O processo de criação de modelos 3D a partir de objectos ou lugares reais envolve algumas etapas bem conhecidas (Figura 3.2): planeamento, aquisição dos dados e seu processamento - onde podem ser usados os vários métodos referidos em 3.2, sendo os mais eficientes e utilizados a Fotogrametria e/ou o varrimento laser; a modelação, que envolve a reconstrução da geometria do objecto, e a renderização, onde são associadas texturas e efeitos de luz aos modelos, tornando-os, sempre que seja requerido, o mais fotorealísticos possível.

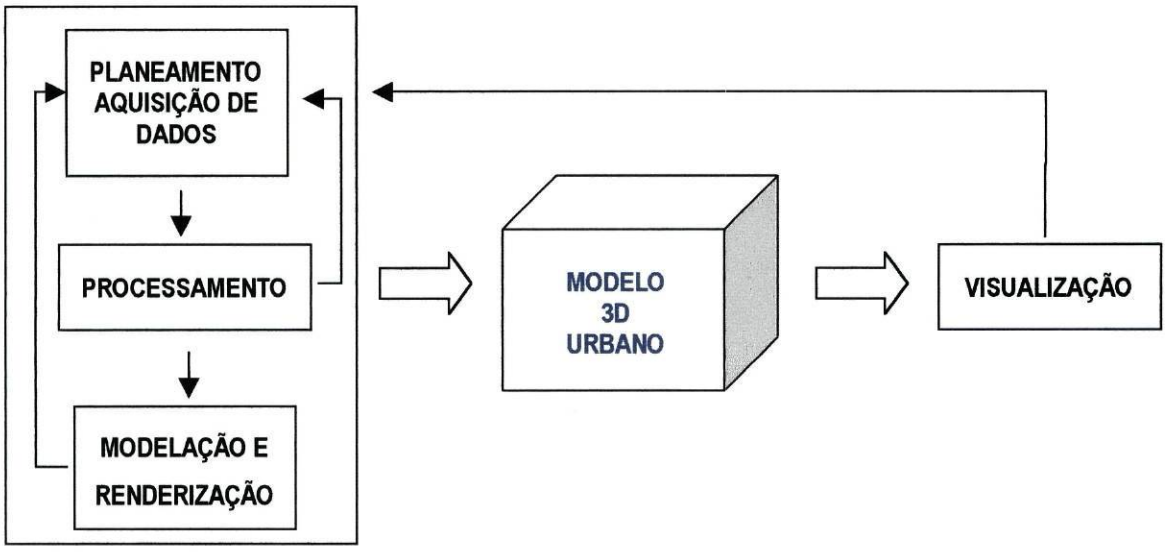


Figura 3.2 – Principais etapas na criação de modelos 3D urbanos.

Embora seja um aspecto relativamente extrínseco à criação propriamente dita dos modelos, a visualização dos mesmos é também uma tarefa muito importante, uma vez que é o passaporte para a sua divulgação, nomeadamente através de realidade virtual, via Internet ou CD multimédia, por exemplo.

Os modelos 3D urbanos são usados nas mais variadas aplicações desde o planeamento e gestão urbanística, arquitectura, realidade virtual, simulação de propagação de ondas rádio para as indústrias de telecomunicações, simulação de catástrofes, impacte ambiental, turismo, entre tantas outras.

Na realidade, depois de um estudo realizado, a nível mundial, por Batty *et al.* em Março de 1998 conclui-se que os modelos 3D estão em plena ascensão e que o grupo de aplicações é ainda maior do que o previsto à partida. Foram identificadas 63 aplicações importantes, 38 das quais desenvolvidas em cidades com mais de um milhão de habitantes, em contraste com as 25 existentes em cidades com uma densidade populacional inferior. O aspecto da visualização está presente em todas elas e quanto maior, mais complexa e rica é a cidade, mais desenvolvimento surge nesta matéria. Especial destaque vai para as cidades de Nova York, Tóquio e Los Angeles, como tendo os modelos 3D mais elaborados em termos de visualização. Foram encontradas um elevado número de aplicações, por exemplo, em Tóquio foram identificadas 15 utilizações diferentes dos modelos, onde o impacto estético causado pela construção de novos edifícios mostrou ser o principal foco de interesse.

A elaboração dos modelos 3D urbanos encontra-se dependente do objectivo para que são criados. Se forem executados para propósitos de estudos e exploração (e.g. na arquitectura) então os requisitos têm de ser muito mais exigentes do que se forem criados para, por exemplo, turismo virtual, uma vez que, no primeiro caso, pode ser necessário a medição de algumas características geométricas. Assim, um modelo 3D urbano, no primeiro caso, tem de fornecer informação métrica credível e textura fotorealística para adequada interpretação. Na segunda situação a precisão geométrica não é tão importante, realçando-se a visualização. Este facto tem de estar presente aquando do planeamento para a realização dos modelos 3D.

Os modelos 3D urbanos têm algumas vantagens na representação das cidades: a primeira diz respeito ao conteúdo (também chamado nível de detalhe) presente nestes últimos. Na Tabela 3.1 tem-se as várias possibilidades de representação das cidades, por ordem crescente de conteúdo, desde os mapas 2D até ao modelos 3D urbanos mais elaborados.

A segunda vantagem é permitir, por bem simples que seja o modelo 3D urbano, a criação de quantas perspectivas quantas a que se queiram, permitindo a análise global de todo o modelo e possíveis

alterações do mesmo (e. g. novos edifícios). Deste modo, qualquer projecto pode ser visto de todos os ângulos sendo, assim, possível, uma impressão mais precisa do seu tamanho e relações com a envolvente e restante cidade.

Tabela 3.1 – Tipo de representação versus nível de detalhe (Adaptada de Batty *et al.*).

TIPO DE REPRESENTAÇÃO	NÍVEL DE DETALHE
2D e ortofotomapas digitais	Baixo
Modelos 3D simples – *wireframe* e renderizado com texturas	↓
Modelos 3D simples renderizados com textura de fotografias	↓
Modelos 3D com pormenor arquitectural incluindo a morfologia dos telhados	↓
Modelação Volumétrica CAD completa com fotorealismo associado	Elevado

Outra grande vantagem dos modelos 3D urbanos é a possibilidade de serem difundidos via Internet , uma vez que podem ser gravados em formato VRML (*Virtual Reality Modeling Language*)(4.2.2), tornando-se interactivos.

Como desvantagem aponta-se o facto de a criação de modelos 3D urbanos detalhados ser ainda um processo moroso requerendo, muitas vezes, grande quantidade de trabalho manual. Esta situação tende a mudar, uma vez que vários autores estão a desenvolver e melhorar métodos e sistemas de modelação automática e autónoma de modelos 3D urbanos. Alguns exemplos podem ser encontrados em Gruen e Wang (1999) e Brenner *et al.* (2001).

3.1 PROCESSAMENTO DE DADOS PARA A CONSTRUÇÃO DOS MODELOS 3D

O processamento de dados para a construção dos modelos tridimensionais urbanos é uma das fases mais importante de todo o processo, uma vez que todas as outras estão dependentes do sucesso desta. Um dos aspectos importantes a ter em consideração antes da aquisição de dados propriamente dita, é saber qual o propósito da criação do modelo, uma vez que, dependendo da aplicação a que se destina, a sua precisão pode ser mais ou menos elevada e, consequentemente, o processamento dos dados que lhe darão origem, mais ou menos rigorosa.

Para aplicações em que a precisão geométrica dos modelos é importante, e em que seja necessário um certo nível de detalhe, o ideal será que os dados sejam adquiridos de forma a dar origem a

produtos que se encontrem à escala 1:1 000. No entanto, seja qual for a aplicação para que vão servir, aconselham-se sempre escalas superiores a 1:5 000, excepção feita a modelos que apenas vão servir para criar realidades virtuais (Bourdakis, 1999).

Nas secções seguintes pretende-se efectuar um resumo dos princípios fundamentais que regem os dois principais métodos de aquisição e processamento de dados para a criação de modelos tridimensionais urbanos: a Fotogrametria e o varrimento laser aéreos, dando-se especial relevo ao primeiro por ter sido aplicado neste trabalho.

De salientar que os arquivos arquitectónicos criados utilizando a Fotogrametria terrestre, como explicado no capítulo anterior, são também usados para criar modelos tridimensionais de edifícios. No entanto, não são normalmente utilizados para a criação de modelos 3D de áreas urbanas muito grandes, mas apenas de edifícios pontuais ou pequenas áreas.

3.1.1 FOTOGRAMETRIA AÉREA

A Fotogrametria[1] aérea, como ciência largamente explorada e divulgada, é um dos métodos mais utilizados na aquisição de dados geográficos, inicialmente para obtenção de mapas, ortofotomapas e modelos digitais de terreno e, mais recentemente, para a criação de modelos 3D urbanos, especialmente devido à sua precisão e à possibilidade de abranger, de uma só vez, uma grande área de terreno de uma forma detalhada. A Fotogrametria digital trouxe ainda a possibilidade de implementação de algoritmos para automatização de várias tarefas, tornando o processo fotogramétrico ainda mais fácil, intuitivo e rápido.

A Fotogrametria sofreu enorme evolução ao longo dos tempos, começando na fase analógica seguida pela Fotogrametria analítica até à presente Fotogrametria digital.

A Fotogrametria digital tem os seus inícios por volta da década de 70, tendo como grande inovação a utilização de fotografias digitais (imagens) como fonte primária de dados. Estas podem ser obtidas com câmaras digitais (pouco usual na Fotogrametria aérea) ou por rasterização com um *scanner* especialmente criado para o efeito. Nos anos 90, com o aumento da capacidade de armazenamento e processamento dos computadores, a Fotogrametria digital começou a ser usada extensivamente tendo-se dado especial ênfase a investigações no sentido da automatização de um grande número de tarefas. Os instrumentos utilizados são as estações fotogramétricas, computadores com *hardware* especial e *software* inteiramente dedicado à Fotogrametria.

---

[1] Os conceitos matemáticos fundamentais inerentes a esta ciência são revistos no Apêndice A.

O processo fotogramétrico requer a execução de três fases muito importantes: o planeamento e aquisição das fotografias e pontos de controlo, o pré-processamento dos dados, nomeadamente a orientação das fotografias e, por fim, a extracção de informação que dá origem ao produto final. Normalmente, após a restituição existe uma outra fase chamada de edição e completagem da informação extraída, na qual se corrige erros ou completa lacunas resultantes da fase da restituição fotogramétrica.

3.1.1.1 PLANEAMENTO PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS

O planeamento para a aquisição de dados na Fotogrametria aérea é semelhante ao que é efectuado para a Fotogrametria terrestre (2.3.3), nomeadamente no que diz respeito aos parâmetros essenciais considerados. Na fotografia aérea, a aquisição das fotografias é efectuada com um avião especialmente adaptado seguindo o plano de voo, apropriado ao produto final requerido. O planeamento consiste, tal como na Fotogrametria terrestre, na determinação das especificações, tais como: câmara e filme, escala, altura de voo, sobreposições e realização de um mapa de voo que detalha as fiadas e exposições, normalmente desenhadas numa carta topográfica.

Outra fase importante de todo o processo é o levantamento dos pontos de controlo, que é feita, normalmente recorrendo a métodos topográficos. A localização dos pontos de controlo tem também que ser devidamente planeada para que a orientação absoluta (Apêndice A), quer dos modelos individualmente quer recorrendo à triangulação aérea, seja possível e tenha uma boa precisão. Servem, portanto, para dar aos modelos uma orientação correcta e uma determinada escala com respeito a um sistema de referência geodésico, através de uma transformação entre as coordenadas modelo e as coordenadas terreno de pontos facilmente identificáveis nas fotografias. Os pontos de controlo são seleccionados depois de reveladas as fotografias e de um estudo cuidadoso das mesmas, ou podem ser pré-sinalizados no terreno antes do voo ter lugar. Aquando do levantamento em campo deve ser efectuado um croqui que permita a identificação correcta e indubitável do ponto em questão, sendo-lhe também atribuído uma numeração.

Para mais detalhes ver, por exemplo, Wolf (1983) e Slama (1980).

3.1.1.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS

No que diz respeito ao pré-processamento dos dados, pretende-se converter a informação geométrica da fotografia num produto final capaz de ser usado para o fim pretendido, ou seja, efectuar a reconstituição precisa do objecto. Os modelos matemáticos para cálculo das coordenadas tridimensionais de pontos de um objecto são desenvolvidos tendo em conta os conhecimentos sobre os processos físicos de obtenção de fotografias e medição. Normalmente estas coordenadas são estimadas pelo método dos mínimos quadrados (Slama, 1980).

O pré-processamento dos dados prende-se com a orientação das fotografias, necessária para que seja determinada a posição da câmara, sensor, fotografia ou modelo em relação a um dado sistema de referência, ou seja, para relacionar o sistema de coordenadas da fotografia/imagem com o sistema de coordenadas no terreno. A orientação do feixe de raios luminosos projectados do objecto no negativo pode ser obtida através da orientação interna e orientação externa ou da orientação interna juntamente com a orientação relativa e absoluta. Os diferentes tipos de orientação estão resumidos no Apêndice A.

3.1.1.3 EXTRACÇÃO DE INFORMAÇÃO

Depois das fotografias serem devidamente orientadas, a informação presente no modelo estereoscópico pode ser extraída para fins cartográficos uma vez que contém todas as propriedades geométricas de um mapa. No caso específico de extracção de informação para posterior criação de modelos tridimensionais urbanos não existem regras específicas. No entanto, os objectos mais importantes a serem extraídos são os edifícios, através da extracção dos telhados, que devem, de preferência, formar polígonos fechados, e da medição da cota do pavimento. Para a criação de um modelo 3D urbano mais detalhado é necessário extraírem-se também as ruas, as árvores e outras estruturas importantes aí existentes (e.g. estátuas). Na maioria dos *softwares*, a extracção é feita em sistemas CAD.

A geração de modelos digitais de terreno (MDT) é também importante para servir de base aos edifícios levantados e dar uma visão geral do relevo da cidade. Estes MDT são extraídos depois da fase de pré-processamento dos dados, e deverão conter informação relativa ao terreno, como sejam linhas de quebra, linhas de água, assim como pontos distribuídos por todo o modelo de forma a que sejam uma amostra representativa do terreno.

3.1.2 VARRIMENTO LASER AÉREO

O desenvolvimento da técnica de varrimento laser aéreo foi motivado pela necessidade crescente da criação de modelos digitais de terreno (MDT), por um número elevado de utilizadores, uma vez que os métodos tradicionais (Topografia e Fotogrametria) não eram suficientemente rápidos para os manter actualizados. O varrimento laser é assim uma tecnologia que permite a obtenção desses modelos de uma forma mais rápida e mais directa, permitindo também a geração de modelos digitais de superfícies (DSM). Nos DSM são registadas as posições tridimensionais de pontos que estão distribuídos na superfície terrestre, desde o solo até árvores e edifícios. Verificou-se rapidamente o interesse na investigação desta tecnologia aplicada à extracção de edifícios, árvores e outras estruturas existentes no ambiente urbano, a partir dos dados obtidos por varrimento laser, com o objectivo de criar modelos 3D urbanos, de uma forma automática (e.g. Weidner e Forstner, 1995; Haala e Brenner, 1997).

Antes de se descreverem os princípios básicos dos sistemas de varrimento laser aéreo, convém definir o termo laser *scanning* (varrimento laser). Os laser *scanners* utilizam mecanismos de varrimento óptico-mecânicos, tal como os *scanners* espaciais a bordo do satélite *Skylab* ou o *Thematic Mapper* TM no satélite *Landsat* (Wehr e Lohr, 1999) sendo, no entanto, um sistema activo que usa um feixe laser para "iluminar" o terreno.

O sistema *Airborne Laser Scanning* (ALS) ou *Airborne Laser Terrain Mapper* (ALTM) é um sistema que permite adquirir coordenadas tridimensionais (X,Y,Z) do terreno, com uma grande precisão (especialmente na componente altimétrica) e de uma forma muito eficaz, uma vez que o sensor está localizado numa aeronave, o que faz com que a aquisição seja extremamente rápida. O laser mede somente a distância entre a abertura e um ponto na superfície terrestre. A posição 3D dos pontos só pode ser calculada se, a qualquer altura do varrimento, for conhecida a posição e orientação do laser, em relação a um dado sistema de coordenadas.

Esta técnica é, por vezes, mencionada como LADAR (*Laser Detection and Range*) e LIDAR (*Light Detection and Range*). Este último termo é mais abrangente uma vez que a referida "luz" (*light*) no anacronismo, não necessita de ser necessariamente laser, embora este seja o mais utilizado.

Os sistemas de varrimento laser existentes no mercado são produtos resultantes da integração de vários componentes, essenciais para o seu perfeito funcionamento. Alguns componentes operam na aeronave enquanto outros estão colocados no terreno.

Os componentes básicos do sistema ALS são (Figura 3.3):

- Sensor Laser (*LASER Range Finder* – LRF): computador e *software* para controlo on-line
- Sistemas GPS e IMU (e.g. *Applanix* que integra GPS/INS)
- Receptores GPS no solo e na aeronave com as respectivas componentes
- Unidade de armazenamento de dados (Laser, GPS e Inercial)
- Opção: outros sensores (vídeo ou câmara digital)
- *Software* para planeamento da missão e pós-processamento

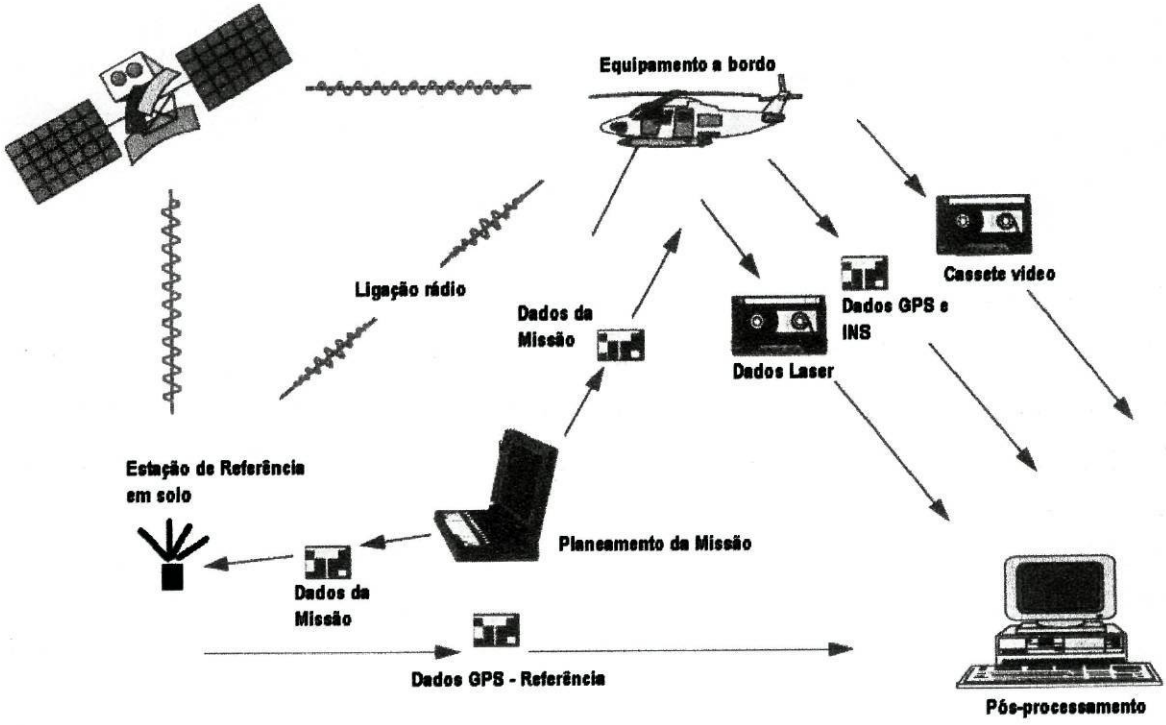


Figura 3.3 – Esquema das componentes do sistema ALS e transferência de dados entre elas (Adaptada de URL8)

O primeiro objectivo para o uso do sistema ALS foi a criação de modelos digitais de terreno e também para o mapeamento de áreas cobertas por vegetação. No entanto, com a difusão desta nova tecnologia em vários países, o seu potencial foi comprovado nas mais diversas áreas, que vão desde telecomunicações – para obtenção de modelos de superficie que permitam estudos sobre propagação de ondas e posicionamento de antenas receptoras, linhas de transmissão – para localização de interferências de árvores e outras estruturas na faixa de domínio, posicionamento de torres e modelação de catenárias dos cabos, modelos 3D urbanos – para planeamento e simulação de projectos de arquitectura ou engenharia civil, visualização e outros (Figura 3.4), obras viárias – para realização do projecto ou para a detecção rápida de interferências na faixa de domínio, cálculo de volumes e aterro (Figura 3.5) até estudos específicos de corredores – como o varrimento laser pode ter

uma largura de faixa ajustada, o sistema é eficiente na captura e modelação de faixas estreitas como estradas e corredores das linhas de energia de alta tensão, possibilitando a obtenção de perfis com boa qualidade, entre muitas outras.

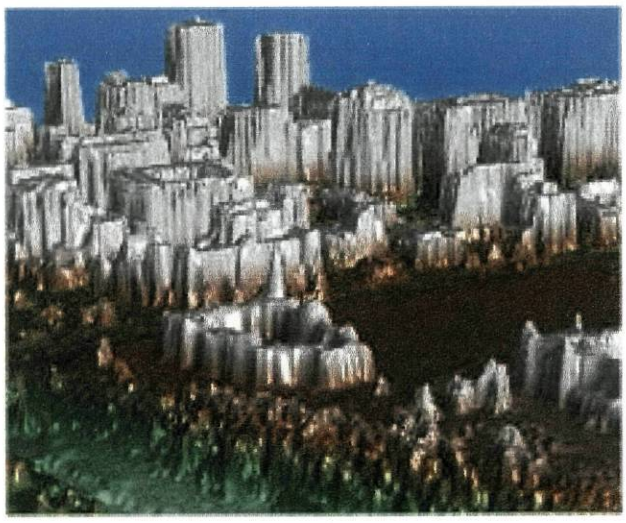


Figura 3.4 – Aplicação em modelos 3D urbanos (URL8)

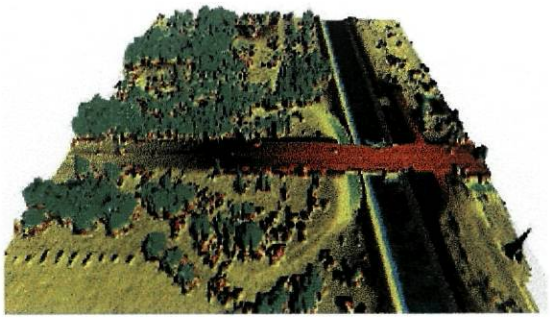


Figura 3.5 – Aplicação em obras viárias (URL8)

3.2 MODELAÇÃO GEOMÉTRICA E RENDERIZAÇÃO – RECONSTRUÇÃO DO MODELO 3D

Após a extracção de informação, por qualquer dos métodos descritos, tem-se então uma quantidade de pontos ou linhas, que são a base para a reconstrução tridimensional do objecto propriamente dita. A reconstrução do objecto tem duas fases importantes:

- modelação geométrica, que consiste na criação do modelo geométrico tridimensional (modelado geometricamente a três dimensões) do objecto, de um ponto de vista vectorial. Deste fazem parte, normalmente, um grande número de polígonos, mostrando a localização dos objectos e a sua topologia, baseado apenas nas suas formas geométricas;

- renderização que consiste no mapeamento de texturas e aplicação de um algoritmo de renderização propriamente dito (*rendering*) com o objectivo de dar ao modelo um certo grau de realismo, que é bastante elevado quando as texturas são imagens do objecto real (e.g. fachada de um edifício) obtidas com câmaras fotográficas. A Figura 3.6 apresenta o modelo geométrico criado a partir da extracção de informação fotogramétrica, bem como o modelo renderizado.

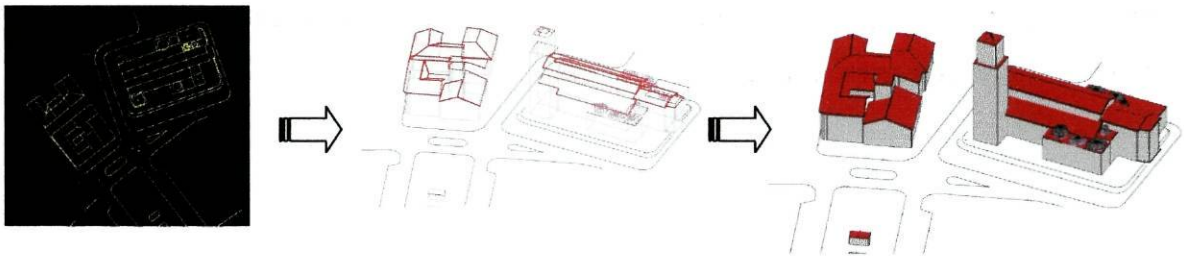


Figura 3.6 – Informação base, modelação geométrica e renderização.

As duas fases fazem então parte de um só processo, e têm de ser bem integradas, sendo que a modelação geométrica tem de ter uma certa precisão e aproximar-se muito do objecto real para que não haja distorções aquando do mapeamento da textura. Estas distorções fazem com que o realismo pretendido seja mais reduzido (El-Hakim *et al.*, 1998). Relativamente à textura, quando se utilizam imagens reais obtidas com câmaras fotográficas (vista perspectiva ou panorâmica do objecto), estas têm de ser compensadas de distorções, através do processo de rectificação (Varshosaz, 2003) (Apêndice B). No entanto, dependendo da aplicação (e.g. turismo) podem corrigir-se os erros para melhorar a visualização, uma vez que a precisão geométrica passa a ser secundária.

A modelação geométrica e a renderização são importantíssimas para que o modelo contenha toda a informação necessária por forma a que seja possível ver e reconhecer o objecto de todas as direcções. Assim, para além de serem visíveis as relações geométricas são também visíveis renderizações realísticas dos objectos. Esta representação digital 3D é também chamada de *Visually Realistic Model* (VRM) (Varshosaz, 2003).

3.2.1 MODELAÇÃO GEOMÉTRICA

A modelação geométrica é essencial para a reconstrução digital de edifícios ou outros objectos que representem o melhor possível os seus originais. A modelação geométrica de objectos simples é estabelecida com base em primitivas geométricas como cubo, prisma, cone, cilindro, etc., ou uma combinação destas. É uma representação do tipo *wireframe* (estrutura de arame). Os objectos complexos são representados também pelas primitivas geométricas ou pela sua combinação, mas a representação é muito mais detalhada e complexa, sendo necessário recorrer a ferramentas de modelação 3D, chamados de modeladores de superfície e modeladores de volumes (sólidos).

A modelação geométrica tem sido feita, até recentemente, quase exclusivamente em sistemas CAD, dada a sua versatilidade, inclusão de ferramentas específicas de modelação 3D e divulgação a nível mundial. Para além disso, dada a complexidade dos objectos a modelar, o processo requer uma

grande intervenção por parte do operador. No entanto, hoje em dia, a modelação geométrica de objectos, particularmente de edifícios, atingiu um nível razoável de automatismo (Haala e Brenner, 1999; Gruen, 2001), havendo inclusive algum sucesso no que respeita à completa automatização da reconstrução da forma geométrica dos edifícios.

Os polígonos são, sem dúvida, a melhor solução para representar com exactidão as medições efectuadas permitindo uma descrição apropriada do objecto em estudo. No entanto, enquanto a geração de MDT tem uma grande tradição e apresenta soluções eficientes, a correcta modelação de polígonos fechados (como edifícios) ou objectos de forma livre (como automóveis) é ainda muito recente, não estando totalmente resolvida e sendo ainda alvo de aturada investigação (Remondino, 2003).

Independentemente da modelação ser feita de forma manual, automática ou autónoma, os modelos tridimensionais podem ser subdivididos em três classes independentes capazes de representar, com vantagens e desvantagens, os objectos do mundo real:

- **Modelos de estrutura em arame** (*wireframe models*): são definidos por um conjunto de vértices unidos através de linhas e arcos, fazendo parecer uma estrutura em arame, através da qual é possível visualizar a envolvente ao objecto, sob qualquer ponto de vista, criando um aspecto realístico, especialmente no que diz respeito à forma e posição relativa do objecto. Estes modelos são a forma mais simples de representação 3D dos objectos e servem na perfeição para modelar objectos simples. O modelo interno do computador está confinado basicamente às esquinas do objecto, não existindo qualquer tipo de relação entre estas, pois não está definida uma relação com as faces. Pontos e linhas são os únicos elementos geométricos de um modelo em estrutura de arame e são representados no computador pelas suas coordenadas do espaço geométrico. A Figura 3.7 mostra um exemplo de edifícios modelados em estrutura de arame, onde nem sempre a sua visualização é de fácil interpretação, dependendo especialmente do ângulo de visão.

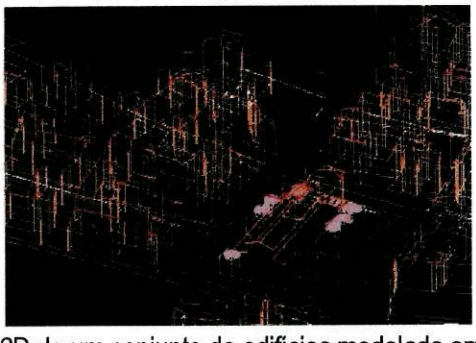


Figura 3.7 – Modelo 3D de um conjunto de edifícios modelado em estrutura de arame.

- **Modelos de superfícies** (*surfaces models*): a modelação por superfícies representa o objecto como um conjunto ordenado de superfícies no espaço tridimensional. Os modelos de superfícies descrevem os objectos como uma combinação de vértices, arestas e superfícies virtuais com espessura igual a zero. Os modeladores de superfícies criam uma superfície a partir da projecção, revolução ou extrusão de elementos que formam o objecto (linha, polígono, elipse, ou formas mais complicadas). Estas superfícies podem ter diversos graus de complexidade, não sendo facilmente descritas por meios analíticos. Para poderem ser representadas matematicamente recorre-se, na maioria das vezes, a aproximações, onde a superfície é representada entre pontos dados por uma função paramétrica. Existem alguns procedimentos matemáticos para modelar superfícies como as curvas de *Bézier* – geralmente interpolações chamadas de *spline* e B-*spline* (Mortenson, 1997).

  Uma superfície pode ser geometricamente representada de uma forma implícita (sendo solução da função F(x,y,z)=0) ou de uma forma paramétrica (uma reunião de pedaços unidos convenientemente) (Remondino, 2003). Os *softwares* de modelação 3D, nomeadamente os CAD têm implementados algoritmos que permitem ao operador construir superfícies, das mais simples às mais complexas, a partir de entidades geométricas primitivas, como sejam, linhas, curvas, círculos, arcos, etc. Cada superfície independente não tem representação no mundo real. A Figura 3.8 pretende mostrar a mesma zona da figura anterior, mas desta vez como um conjunto de superfícies que unem os vários pontos do objecto, sendo visíveis as linhas que separam superfícies independentes.

A modelação por superfícies é o meio de modelação mais exigente e também o que requer um cálculo mais intensivo.

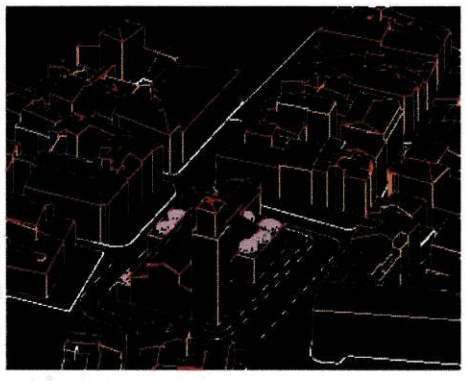


Figura 3.8 – Modelo 3D de um conjunto de edifícios obtido com modeladores de superfícies.

- **Modelos volumétricos** (*volumetric models*): representam os objectos tridimensionais por volumes ou sólidos. A estrutura de dados permite operações boleanas, bem como o cálculo de volume, do centro de gravidade e da área da superfície. Os modelos de sólidos representam sempre a hierarquia do objecto, onde as primitivas e as operações são definidas. À semelhança dos modeladores de superfícies, a modelação por sólidos ou volumétrica é também baseada na modelação de formas geométricas primitivas, sendo depois criadas as entidades com volume. Estes modelos são completos e não ambíguos. Completos significa que é impossível definir ou representar um volume se faltar uma superfície ou uma aresta. Por outro lado é também impossível introduzir superfícies ou cantos dentro do modelo que não pertençam a um sólido (Mortenson, 1997). A Figura 3.9 mostra o modelo tridimensional de vários edifícios obtido utilizando modeladores volumétricos. Esta classe de modelos 3D cobre um número grande de diferentes subclasses de representação da geometria, como por exemplo, representações paramétricas, decomposição de células, representações de fronteiras (*Boundary Representations*) (BRep) e geometria sólida construtiva (CSG) (*Construtive Solid Geometry*).

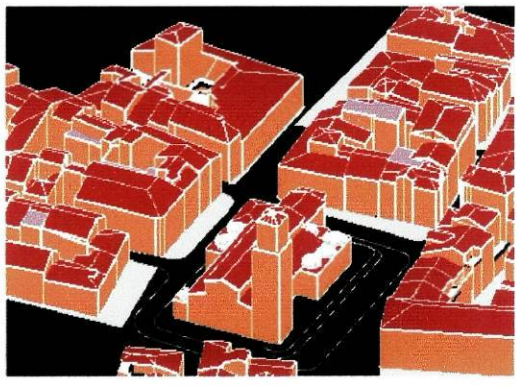


Figura 3.9 – Modelo 3D de um conjunto de edifícios obtido com modeladores volumétricos.

Os modeladores de volume mais usados são a BRep e a CSG. São especialmente usados para métodos de modelação semi-automática e automática (e.g. Forstner, 1999; Brenner et al., 1998; Brenner, 1999). A representação BRep pode ser adoptada para modelar por superfícies e por sólidos, enquanto que a representação por CSG é apenas adoptada para modelação por sólidos (Van Den Heuvel, 2000). Em ambos as situações têm de existir modelos de edifícios ou superfícies previamente definidos, ou seja, parametrizados para que o algoritmo consiga modelar os dados e reconstruir a forma geométrica do objecto.

Para além dos modelos de superfície, de estrutura de arame e de sólidos, considerados como representações "puras", são também utilizados os modelos híbridos. A definição de modelos híbridos não está claramente estabelecida sendo utilizada em sistemas que lidam com modelos de estrutura de

arame e de superfícies ao mesmo tempo. No entanto, o termo modelos híbridos também é utilizado para descrever os modeladores que permitem a construção de modelos de sólidos e de superfícies na mesma interface gráfica. Por outro lado, também são referidos como sendo modelos de volumes, que usam parcialmente uma representação CSG e uma BRep. Os modelos híbridos distinguem uma estrutura primária que é responsável pela exactidão do modelo e por todos os algoritmos de modelação relevantes, e uma estrutura secundária para tarefas específicas. O principal objectivo desta segunda estrutura é muitas vezes a visualização rápida dos objectos no ecrã.

A representação de fronteiras descreve um objecto tridimensional pelos seus elementos de fronteira (faces, vértices e arestas). Nesta representação está implícita uma certa hierarquia na estrutura de dados: um objecto é definido pelas suas faces (planos), as faces pelas suas arestas (linhas) e as arestas pelo seus vértices (pontos) e estes pelas suas coordenadas (X, Y, Z). Assim, um modelo BRep está organizado geometrica e topologicamente. Enquanto a parte topológica descreve as relações entre vértices, arestas e faces, a parte geométrica retém a informação geométrica dos elementos topológicos (e.g. as coordenadas dos vértices).

A geometria sólida construtiva descreve o objecto por um conjunto de primitivas volumétricas e operações boleanas básicas entre essas primitivas. A ideia base é que objectos complexos são representados por adições, subtracções e intersecções entre objectos simples, aplicadas de um modo ordenado. As primitivas, que são usadas para construir sequencialmente o modelo, são directamente visíveis na estrutura de dados. Assim, primitivas geométricas como cubos, cones, globos, cilindros, etc., existem na estrutura de dados como primitivas e podem ser acedidas directamente, formando o nível geométrico mais baixo.

A Figura 3.10 dá a ideia do que acontece com as primitivas gráficas na representação BRep e CSG para um mesmo objecto, onde fica visível a diferença entre estas duas abordagens, bem como a sua definição.

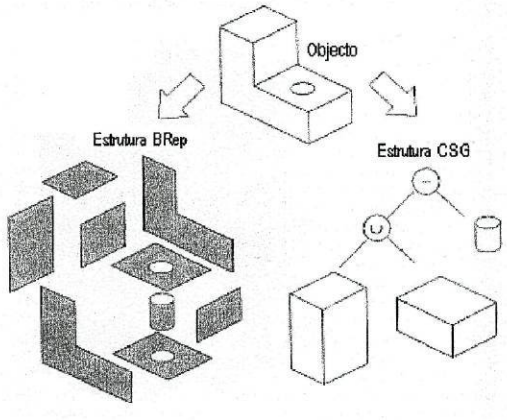


Figura 3.10 – Estrutura BRep e CSG relativa ao mesmo objecto (adaptado de Grussenmeyer *et al.*, 2002).

A Tabela 3.2 dá uma visão geral dos diferentes níveis das técnicas de modelação falados anteriormente e as possíveis parametrizações. Notar que, com excepção da modelação por pontos, é possível aplicar informação topológica a todos os outros modelos.

Tabela 3.2 – Técnicas de modelação e parametrização da geometria (adaptada de Van Den Heuvel, 2000).

Modelação por:	Geometria	Topologia	BRep	CSG
Pontos	Coordenadas do ponto			
Estrutura de arame	Parâmetros de linhas (curvas ou rectas)	Sim		
Superfícies	Superfícies paramétricas	Sim	Sim	
Sólidos	Parametrização do modelo do objecto	Sim	Sim	Sim

3.2.2 RENDERIZAÇÃO

A renderização é a segunda fase da reconstrução do objecto que complementa o modelo no que diz respeito à sua semelhança visual com o original. A renderização comporta duas fases: o mapeamento de texturas e o *rendering*.

- **o mapeamento de texturas**, que é uma técnica extremamente importante para dar um aspecto real ao objecto criado no computador (Heckbert, 1986). Na sua forma mais básica consiste na atribuição de uma imagem (a textura) ao objecto modelado, requerendo correspondência entre coordenadas objecto e coordenadas imagem, no caso particular de uma imagem real. Deste modo, fornece um mapeamento preciso sobre geometria obtida com precisão, sendo por isso um método recomendado (Zlatanova e Tempfli, 2000) e muito utilizado em objectos onde é necessário um ajuste exacto, como sejam telhados e fachadas de edifícios.

  As texturas podem ser criadas com um programa de desenho (textura artificial) que têm a desvantagem de ser demasiadamente regulares e "limpas" ou criadas a partir de imagens/fotografias para simulação dos objectos ou cenas reais. A Figura 3.11 mostra duas imagens da mesma cena, uma onde foram aplicadas texturas artificiais existentes no computador, e outra onde as texturas aplicadas são de imagens reais. Ao aplicar texturas reais ao modelo 3D este torna-se muito mais autêntico, melhorando a qualidade visual ou o chamado fotorealismo (fotorealismo significa que não existem diferenças entre o modelo renderizado e a fotografia tirada do mesmo ponto de visão (El-Hakim *et al.*, 2002).

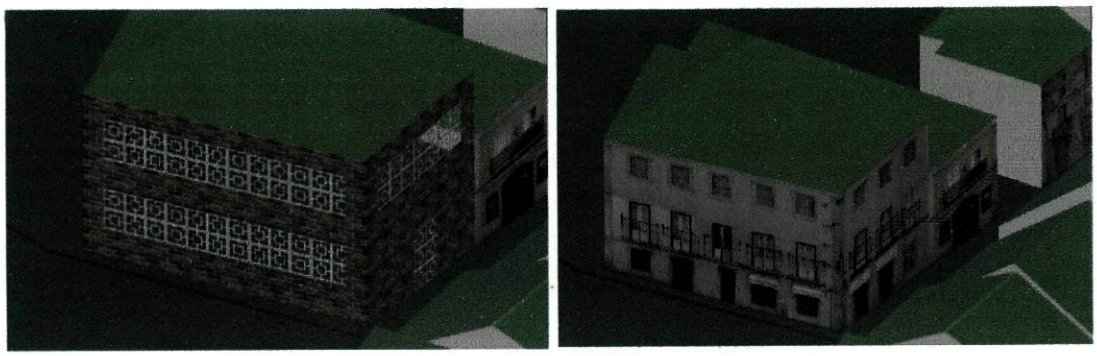


Figura 3.11 – Exemplo de um edifício renderizado com textura artificial (esquerda) e o mesmo edifício renderizado com a textura real (direita).

As imagens utilizadas para o mapeamento de texturas reais são normalmente obtidas com câmaras fotográficas, apresentando algumas desvantagens, tais como: estarem dependentes das condições atmosféricas que existiam na altura em que a fotografia foi obtida, apresentam geralmente distorções devido a problemas de perspectiva e relevo, e a qualidade da imagem pode ser insuficiente. Relativamente às distorções, as imagens que vão servir de texturas têm de ser corrigidas através de processos de rectificação (Apêndice B). Se, para cobrir todo o objecto, houve necessidade de tirar mais do que uma fotografia, todas têm de ser processadas da mesma maneira sendo necessário efectuar a criação de mosaicos a partir delas para se ficar com uma única textura. Para além disso, a qualidade da textura resultante deverá ser homogénea, o que é conseguido pelo processamento radiométrico das imagens.

- o ***rendering***, onde é utilizado um algoritmo de renderização, consiste no processo de representação de modelos tridimensionais através da visualização de superfícies às quais foram aplicadas texturas, artificiais ou reais, associando-lhe características como a iluminação, transparência, cor, reflexão difusa ou especular e refracção, com vista a torná-lo ainda mais real. Para além disso, um *rendering* de elevada qualidade exige a definição correcta das propriedades dos materiais que fazem parte do modelo.

Assim, pode concluir-se que a renderização é o processo em que todos os dados que permitem a caracterização do modelo (forma, textura, cor, posição e luz) são convertidos em imagem.

As técnicas mais conhecidas e utilizadas para renderizar objectos são (Patias, 2001):

- ***Solid Shading***: onde todo o objecto é renderizado com as mesmas sombras dependendo do ângulo de visão;

- ***Scanline***: renderiza o modelo como uma série de linhas horizontais e verticais;

- ***Smooth Shading***: onde cada polígono é sombreado de maneira diferente;
- ***Phong Shading***: renderiza o modelo atribuindo um valor de luminosidade às coordenadas que representam um vector. O vector é a reflexão da superfície do feixe de luz que é projectado desde o olho até um ponto nessa mesma superfície. A função luminosidade depende da localização da fonte de luz. Todo o polígono, inclusive os cantos são renderizados;
- ***Ray Tracing***: renderiza o modelo pixel por pixel testando se um raio de luz intersecta qualquer objecto da cena e calculando a intensidade da luz nessa direcção particular. Deste modo, cada ponto tem um sombreado diferente.

A qualidade e velocidade da renderização depende da maneira como os objectos são renderizados. A técnica *Solid Shading* é muito rápida, enquanto *Phong Shading* pode ser muito lenta, dependendo da complexidade do modelo. A *Scanline* é bastante rápida mas não produz resultados muito realísticos, sendo usada muitas vezes em animação onde a qualidade da imagem em simples fotogramas (*frames*) não é tão importante. *Ray Tracing* é a que permite visualizações mais realísticas, mas que por vezes se pode tornar muito lenta em computadores standard.

Convém referir que o algoritmo de renderização pode ser aplicado ao modelo 3D sem que tenha havido um mapeamento de texturas. Neste caso, os objectos ficam renderizados com a cor que lhes está associada no modelo geométrico, sendo designada por sombreada. É também importante relembrar que o computador tem de ter memória suficiente para renderizar modelos 3D texturizados com texturas a partir de imagens reais (Remondino, 2003).

De referir também que, o tipo de mapeamento de textura e de *rendering* aplicados ao modelo 3D está directamente relacionado com o tipo de aplicação em que o modelo vai ser usado. Ao longo deste texto foram referidos os aspectos e definições importantes que garantem uma boa precisão do modelo como um todo (geométrico e renderizado).

3.3 VISÃO GERAL DE ALGUNS SISTEMAS EXISTENTES PARA MODELAÇÃO 3D URBANA

Existem várias técnicas de aquisição de dados passíveis de serem utilizados para a modelação de modelos 3D urbanos. As principais são: a digitalização de mapas, a Fotogrametria aérea, o varrimento laser e, para modelos muito detalhados, a Fotogrametria terrestre (2.3). A digitalização de mapas não é muito utilizada uma vez que fornece apenas informação 2D sobre os edifícios, sendo necessários

outros meios para adquirir a altura dos mesmos e as configurações dos telhados. A tecnologia de varrimento laser, embora não forneça uma definição muito boa das arestas e a precisão planimétrica seja ainda inferior ao desejável, pode ser bastante útil na definição da altura dos edifícios. A Fotogrametria é, por excelência, um óptimo meio para aquisição de dados para a geração de modelos 3D urbanos (Gruen, 2001). Qualquer das técnicas é válida desde que no final os problemas sejam resolvidos e o produto final atinja os requisitos pretendidos.

Os sistemas de modelação especificamente concebidos para a modelação tridimensional urbana têm em consideração um destes métodos de aquisição de dados. Embora não tenham sido desenvolvidos especificamente para este fim, os sistemas CAD (e.g. *AutoCad* e *Microstation*) possuem óptimas ferramentas para a modelação 3D e são, hoje em dia, muito utilizados, uma vez que são muito populares nas áreas da arquitectura, planeamento e engenharia.

Especificamente criados para a modelação automática e autónoma de modelos 3D a partir de dados obtidos por Fotogrametria aérea, referem-se os seguintes:

O sistema AMOBE (*Automation of digital terrain Model and man-made Object Extraction from aerial images*) que inclui o módulo TOBAGO para geração automática de modelos 3D (Gruen e Dan, 1997) e o módulo ARUBA para a reconstrução automática de edifícios a partir de imagens aéreas (Gruen, 1997).

O sistema *CyberCity Modeler*, da empresa Cybercity AG pertencente à ETH (Eidgenössischen Technischen Hochschule) (Gruen e Wang, 1999) ajusta superfícies planas para medir e estruturar nuvens de pontos, gerando depois objectos compatíveis com formato CAD, como casas, árvores, estradas, etc. (Gruen, 2001).

Ulm (2003) reporta acentuadas melhorias no sistema *CC-Modeler* (*CyberCity Modeler*), nomeadamente no que diz respeito aos dados utilizados, que para além da fotografia comporta agora dados de imagens de satélite e de varrimento laser.

O sistema "IMAGIS 3.0 CyberCity" da empresa Supersoft Inc. possui um módulo de modelação e visualização urbana, que tem funções de modelação 3D com extracção automática de texturas e criação de animações, entre outras funcionalidades.

"InJECT" que é um sistema automático de extracção de objectos da empresa INPHO GmbH, Estugarda, para criação de modelos 3D de edifícios (estruturas 3D de arame) a partir de imagens aéreas ou terrestre devidamente orientadas (Gruen, 2001).

Haala e Hahn (1996) utilizaram técnicas de fusão de dados para detectarem e reconstruírem edifícios. Fisher *et al.* (1997) usou um modelo hierárquico genérico para integrar dados 2D e 3D para a reconstrução. Wu (1998) usou informação CAD bidimensional (e.g. cartas topográficas) para auxílio na obtenção dos telhados a partir de imagens aéreas.

No que diz respeito a abordagens para a reconstrução de modelos 3D urbanos tendo como base os dados obtidos por varrimento laser, refere-se ainda, entre outros, Haala e Brenner (1997) que numa primeira abordagem combinam imagens multiespectrais com laser, fazendo uma classificação integrada para a extracção dos edifícios e numa segunda usam os dados laser com informação de cartas topográficos, donde são retiradas os limites dos edifícios.

4

VISUALIZAÇÃO

A visualização de modelos tridimensionais, quer representem grandes áreas (modelos 3D urbanos), quer sejam de âmbito mais pormenorizado e a uma maior escala (arquivo arquitectónico), é uma fase que valoriza extremamente o modelo através da sua apresentação, permitindo a divulgação e disponibilização do mesmo, de uma maneira atractiva e ao maior número possível de pessoas interessadas.

Os dados obtidos através de observações e de processamento em computadores são, numa primeira análise, portadores de informação que não é entendida imediatamente pela maioria das pessoas. A visualização é o processo de converter diferentes tipos de informação e dados representando-os de uma maneira visual, onde seja possível o fácil reconhecimento de estruturas, estados e comportamentos.

O recurso à computação gráfica, como ferramenta eficaz de visualização tridimensional, é, sem dúvida, importante na compreensão da evolução histórica e arquitectónica (Ferreira *et al.*, 2000), das cidades como um todo, assim como dos monumentos em particular e do meio envolvente, podendo eventualmente motivar a visita à cidade em causa e respectivos monumentos. Hoje em dia, a visualização de objectos e cenários tridimensionais parece ser um objectivo pretendido por muitas das disciplinas relacionadas com dados geográficos, incluindo a Fotogrametria (Fritsch, 2003). Para além disso, a computação gráfica permite uma visualização diferente do habitual, nomeadamente através de aplicações de realidade virtual (RV), que é um termo bastante recente no que diz respeito à apresentação de modelos tridimensionais de cidades e também de arquivos arquitectónicos. A definição de realidade virtual tem suscitado muita polémica, não havendo um consenso geral entre os investigadores. No entanto, e no âmbito desta dissertação, ou seja, no âmbito da visualização de dados geográficos (cartográficos) precisos, pode definir-se como um meio de visualização e simulação de modelos representativos da realidade, permitindo uma interacção directa por parte do utilizador. Segundo Batty e Smith (2002) virtual significa "quase real", ou seja contém a essência da realidade

mas possui um determinado grau de abstracção, não deixando de ser, por este motivo, o melhor meio de simulação, interacção e comunicação activas.

A visualização associada à realidade virtual veio revolucionar determinadas áreas, especialmente no que respeita ao planeamento e *design* do ambiente urbano, uma vez que possibilita aos arquitectos e urbanistas apresentarem os projectos de uma forma mais realística e perceptível. A animação e criação, por exemplo, de registo multimédia via CD-ROM é outro meio eficaz de divulgação dos modelos tridimensionais, associados a outro tipo de informação (e.g. localização e descrição histórica do sítio), com importante contribuição para a consciencialização pública sobre o património cultural.

A visualização é, portanto, o culminar de todas as fases descritas anteriormente, de tal forma que os modelo digitais realísticos criados sejam conhecidos e aproveitáveis para as mais diversas situações, implicando a disponibilização dos modelos 3D em formatos internacionais standard, que suportem a observação 3D interactiva, como por exemplo a linguagem VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) (4.2.2) para distribuição na Internet. Os *softwares* de criação de modelos 3D têm de estar preparados para que possa haver uma conversão de dados correcta para a sua integração nos *softwares* dedicados à visualização. De salientar que a maioria dos *softwares* utilizados na reconstrução do objecto, nomeadamente os CAD, também têm algumas ferramentas de visualização: depois do modelo renderizado é possível visualizá-lo de várias perspectivas, efectuar alguma animação através de *walkthroughs* ou *fly-over* (passeios ou voos) pelos modelos e criar também pequenos filmes (e.g. formato AVI).

Alguns autores consideram que a modelação e renderização são já por si uma forma de visualização, uma vez que facilitam a compreensão e comunicação dos modelos. No entanto, ao longo deste capítulo dá-se ênfase aos aspectos de visualização respeitantes à divulgação dos modelos de forma mais interactiva e atraente que a apresentação pura e simples dos modelos renderizados aquando da reconstrução dos mesmos, seja na forma de animações, realidade virtual, filmes, etc.. Em seguida, focam-se alguns produtos de visualização e técnicas disponíveis, mais utilizadas em trabalhos do âmbito desta dissertação.

4.1 DESCRIÇÃO GERAL

Entre os métodos utilizados para a reconstrução de modelos tridimensionais de precisão, especialmente no que respeita à aquisição de dados e extracção de informação necessária, a fotogrametria é, como já se viu, de extrema importância sendo a mais antiga e eficaz, sempre preocupada com os padrões de qualidade e também com o seu desenvolvimento, nomeadamente a

nível de automatização de tarefas. Relativamente a esforços na área da visualização não tem um grande passado. No início dos anos 90, quando a computação gráfica começou a dar grande ênfase à visualização, alguns fotogrametristas estavam focados no uso de *software* CAD e nas ferramentas genéricas de visualização que eles tinham para oferecer. No âmbito da fotogrametria digital a investigação concentrara-se na automatização do processamento dos dados. Assim, o esforço dizia sempre respeito aos próprios dados não se prestando atenção à sua divulgação como forma de os valorizar. A maior preocupação, no que respeita a visualização, era a monitorização e melhoramento da qualidade dos dados que se manifestava na criação de ferramentas de visualização de elipses de erro e superfícies residuais, etc. (Patias, 2001). Esta preocupação é sem dúvida do âmbito da fotogrametria, não fazendo parte da área o desenvolvimento de técnicas de visualização. Estas foram desenvolvidas por áreas que incluem preferencialmente a computação gráfica e, mais recentemente, a animação cinematográfica e os jogos de computadores. No entanto, rapidamente se constatou a vantagem de associar as novas técnicas de visualização à divulgação da informação geográfica no geral, usualmente obtida através de métodos cartográficos e fotogramétricos. Neste contexto, colocam-se duas opções possíveis: a utilização de ferramentas muito genéricas dos *softwares* CAD, que nem sempre satisfazem os objectivos, ou o uso de *softwares* sofisticados específicos que necessitam de *hardware* também ele especializado. O ideal seria conseguir conjugar as duas hipóteses, o que nem sempre era conseguido da melhor forma, uma vez que os objectivos de uns e outros eram diferentes. Convém referir que a par dos *softwares* CAD, as estações fotogramétricas digitais não tinham grandes capacidades de visualização. Hoje em dia, existem já alguns *softwares* dedicados à extracção de informação obtida por fotogrametria ou varrimento laser com ferramentas de visualização mais especializadas e essencialmente com a possibilidade de converter automaticamente os produtos em formatos facilmente difundidos via *World Wide Web* (WWW – Internet) (e.g. Disp3D e CC-Modeler (Ruther *et al.*, 2001).

Nas primeiras tentativas de visualização de modelos 3D utilizaram-se objectos pequenos (e.g. modelos arquitectónicos, carros, face humana) que foram mostrados em formato *wireframe*. As aplicações da visualização no campo da arquitectura e da arqueologia foram também das primeiras a surgir e a serem desenvolvidas. As experiências iniciais foram efectuadas com o auxílio das ferramentas de visualização existentes nos pacotes CAD (Figura 4.1). Eram usadas quase exclusivamente, a rectificação de imagem e a sua colocação nas fachadas, sendo a sua visualização associada aos objectos 3D conseguida através de animações e *flyovers* básicos, exportados para os formatos de filme, bem conhecidos, AVI e MPEG.

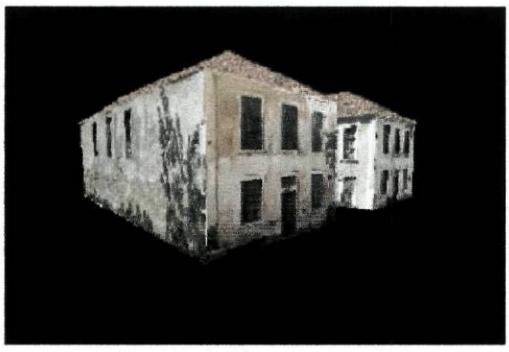


Figura 4.1 – Reconstrução e visualização 3D com o *software Microstation* (Patias, 2001).

A partir de então, o sucesso da visualização foi aumentando e apareceram novas e interessantes aplicações, como se pode ver pela Figura 4.2 – visualização 3D de uma mina de carvão a céu aberto com sobreposição de curvas de nível e pela Figura 4.3 – uma mistura de ambiente urbano real com a colocação de objectos virtuais.

Durante os últimos 5 anos, os fotogrametristas têm-se sentido muito mais atraídos pelas técnicas de visualização que permitem a divulgação dos dados via Internet, que constitui um meio gratuito de tornar a informação disponível a um grande número de utilizadores. Questões como a standarização, eficiência e produtividade continuam a ser pertinentes. No entanto, as aplicações conhecidas têm mostrado uma grande imaginação, existindo uma série de trabalhos e apresentações que justificam o aumento da tendência do uso de VRML (Patias, 2001). Na Figura 4.4 pode ver-se o modelo virtual de Londres, difundido em VRML, onde são visíveis os comandos que permitem a interacção do utilizador com o modelo (Batty *et al.*, 1998).

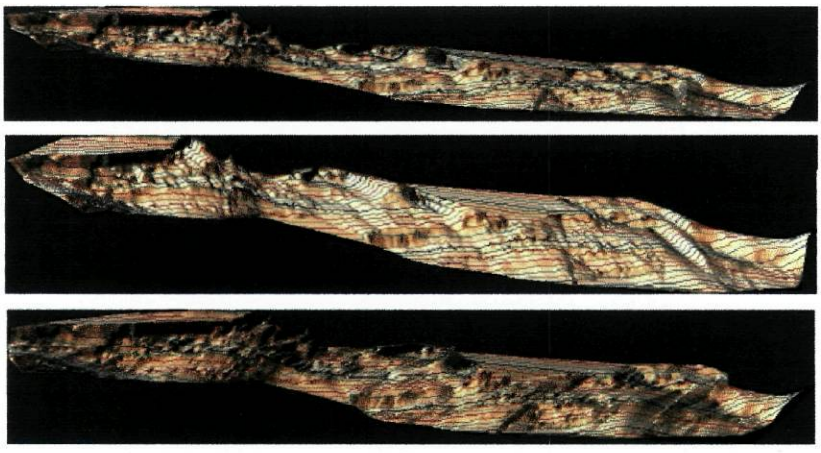


Figura 4.2 – Visualização 3D de uma mina de carvão com sobreposição de curvas de nível (Patias, 1998).

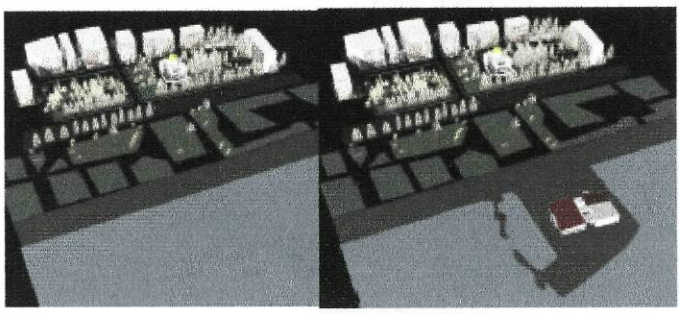


Figura 4.3 – Visualização 3D de objectos reais misturados com virtuais (Patias, 2001).

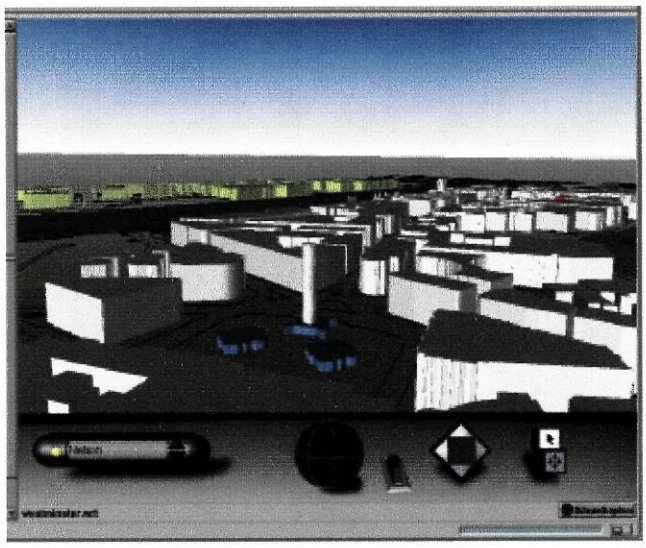


Figura 4.4 – Modelo virtual de Londres em VRML (Batty *et al.*, 1998).

A visualização dos modelos da estátua virtual de Zeus e da antiga Olímpia foi apresentada por ocasião da abertura dos Jogos Olímpicos em Melbourne, 2000 (Ogleby, 2001). Para a modelação foi usado o *software Microstation*, enquanto que todas as animações foram criadas num *software* de visualização – 3D Studio Max. A visualização da antiga Olímpia foi desenvolvida no *software Macromedia Director* (específico para a realização de filmes permitindo a combinação de vários elementos multimédia como texto, som, gráficos, animação e vídeo) usando um "palco" (écran) de 1600×600 pixels. No local foram montados monitores de 4m e colocados projectores para levar o visitante a uma visita guiada através da antiga cidade grega. A Figura 4.5 dá conta da antiga Olímpia virtual e, embora não tenha movimento nem som, percebe-se perfeitamente o encanto causado por esta visualização tão pormenorizada.

Estas são algumas das aplicações que têm sido efectuadas a nível de visualização dos modelos 3D, quer urbanos, quer de âmbito mais restrito referentes ao património cultural. Segundo Patias (2001) o futuro é na direcção de juntar a visualização com os sistemas de informação, na perspectiva de se poder efectuar *queries* interactivas, que permitam obter informação acerca do objecto seleccionado e procurar objectos que satisfaçam determinados requisitos. No primeiro caso, já estão implementadas na VRML e podem ser usadas através da transferência de uma acção para o modelo geométrico.

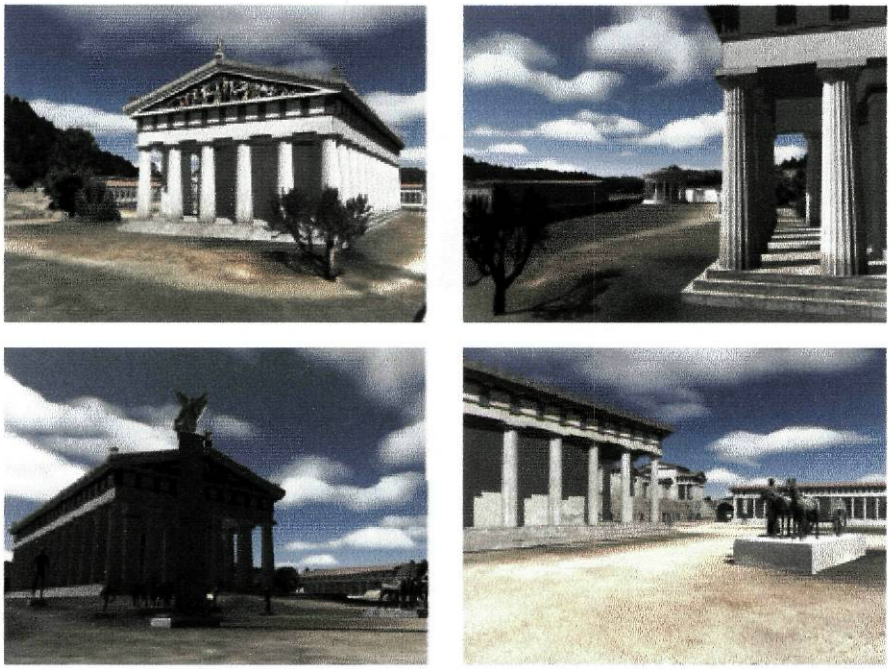


Figura 4.5 – Olímpia virtual. A experiência 3D oferecida aos visitantes foi desenvolvida em *Macromedia* Director (Ogleby, 2001).

Algumas outras acções permitidas pela linguagem VRML incluem: *hyperlinks* a páginas HTML, portais para outras cenas VRML, ou execução de *scripts Java*. Estas ligações entre diferentes bases de dados formam já uma espécie de sistema de informação. A investigação procede e será certamente gratificante em temas que envolvam: formato de dados, estruturas de grandes bases de dados, módulos de *queries* inteligentes, etc.. Cientistas dedicados à criação de modelos 3D urbanos afirmam que o principal problema da visualização é ainda o facto de ter de lidar com bases de dados muito grandes (Brenner, 1999). Associadas aos modelos tem-se sempre, hoje em dia, sombras e texturas, o que faz com que a manipulação destes dados seja ainda mais complicada. Na verdade, para a visualização de grandes conjuntos de dados, muita da informação contida nos modelos fotogramétricos é, muitas vezes, reduzida (Patias, 2001). Como consequência há perda de precisão dos dados, bem como da georeferenciação (a maioria dos *softwares* tem o seu próprio sistema de coordenadas) e também as texturas altamente pormenorizadas ficam inutilizadas devido ao controlo sobre o nível de detalhe (LoD – *Level of Detail*) (Remondino, 2003).

Num futuro próximo, o ideal seria ter sistemas fotogramétricos ou *softwares* de processamento de dados obtidos por varrimento laser baseados na Web (*Web-based photogrammetry*), ou seja completamente difundidos através da *Web*: o *shareware* seria carregado através do servidor da *web*, directamente para o computador do cliente, podendo este efectuar desde as medições até à

visualização que seria assim, directamente difundida na web. Este aspecto, é muito mais abrangente do que a visualização por si só, mas seria um caminho interessante a seguir.

O sistema mais promissor nesta área parece ser o ARPENTEUR (URL9), tendo, no entanto, uma série de desvantagens, expostas pelos seus criadores em Grussenmeyer *et al.*, 1999, nomeadamente no que diz respeito ao tempo demorado na descarga, à instabilidade da linguagem Java e ao tempo de execução. Existe ainda, nesta matéria, um grande caminho a percorrer.

Relativamente à visualização e seus *softwares* as melhorias são contínuas e a sua utilização tem vindo a aumentar. A visualização VRML está, sem dúvida, muito divulgada hoje em dia, existindo já um novo produto – GeoVRML 1.0 – que usa a linguagem standard do VRML, com consideráveis melhorias, nomeadamente no que diz respeito a dados com informação geográfica (e.g. definir sistemas de coordenadas).

4.2 TÉCNICAS DISPONÍVEIS E FERRAMENTAS DE VISUALIZAÇÃO

Não se pretende com esta secção uma descrição exaustiva de todos os produtos e técnicas existentes ao nível da visualização, mas apenas descrever mais pormenorizadamente os que se acham mais importantes e que são utilizados pelo maior número de utilizadores desta área específica da Engenharia Geográfica. Alguns deles serão também utilizados pelo autor no seu trabalho prático.

Os *softwares* que permitem a visualização de informação estão disponíveis no mercado nas mais variadas formas, gratuitos ou comerciais, para grandes modelos ou conjuntos pequenos de dados (Tabela 4.1). Alguns pacotes permitem também a inserção de informação adicional como documentos de texto, *hyperlinks*, música e filmes. Alguns deles são *softwares* que permitem apenas visualizar cenas 3D e com poucas funções de edição (e.g. visualizadores de VRML: *Skyline* (URL10) e *CosmoPlayer* (URL11)). Os *softwares* em itálico na Tabela 4.1 são disponibilizados sem custos, na Internet. Hoje em dia, os sistemas CAD, para além de serem o melhor modo para a reconstrução do objecto, têm também grandes potencialidades no que respeita a renderização dos objectos 3D, com a desvantagem de não oferecerem a possibilidade de exportar os modelos 3D assim criados, num formato 3D standard, ficando-se apenas pelo formato DXF (Ogleby, 2001). No entanto, as novas versões de alguns *softwares* CAD, nomeadamente o *software Microstation* (*Microstation* J), já permitem a exportação de dados para o formato VRML.

Tabela 4.1 – Alguns *softwares* que incluem a visualização de informação.

AutoCad	ArcGis	Virtual GIS
Skyline	Cyberwalk	Macromedia Director
Terra Vista	ArcView	Idrisi
GLView	Cortona	TerraForm
Inventor	*Vis5D+*	*GeomView*
VrWave	*Scene Viewer*	*Cosmo Player*

De acordo com o tipo de modelo (terreno, cidade ou objecto individual) e a visualização requerida (animação, voos e passeios, realidade virtual ou visualização estática) podem ser usados diferentes *softwares* ou módulos. A selecção da aplicação correcta pode ser muito difícil, sendo conveniente fazer uma série de testes com diferentes tamanhos de conjuntos de dados antes de efectuar a escolha.

Segundo Remondino (2003) o *software* de visualização pode ser classificado usando diferentes critérios de qualidade ou parâmetros (e.g. interactividade e nível de detalhe); uma classificação comum é a divisão dos *softwares* tendo em conta a configuração do *hardware* e o seu desempenho em tempo real:

- *Softwares* de visualização de alto nível (*high-end*): são pacotes comerciais que permitem cobrir todas as necessidades de visualização e animação, mesmo em pequenos portáteis (e.g. *Skyline*; PCI"s *Geomatics FLY* (URL12));
- *Software* de visualização de nível médio: ainda conseguem mostrar grandes modelos mas com um desempenho inferior em tempo real (e.g. Virtual GIS (URL13));
- *Software* de visualização de baixo nível (*Low-end*): a maior parte do *software* disponível gratuitamente na *Internet* pertence a este grupo. Apenas conseguem visualizar, em tempo real, pequenos conjuntos de dados (e.g. *CosmoPlayer*).

4.2.1 ANIMAÇÕES 3D

As animações são, historicamente, os primeiros produtos de visualização, não sendo mais do que uma série sequencial de fotogramas (*frames)* que eram produzidas por um pacote CAD. Nas animações o objecto 3D é observado de diferentes ângulos e cada uma das vistas é um fotograma da sequência. Existe inclusive a possibilidade de traçar percursos pré-definidos pelo qual a câmara avança tirando "fotografias". Ao definir o percurso, o operador especifica a posição inicial do observador e também a localização da geometria em vários pontos principais do percurso (fotogramas principais – *keyframes*).

Depois, o sistema de animação calcula automaticamente os fotogramas entre os fotogramas principais. Esses fotogramas são calculados através de um processo chamado *in-betweening* ou *tweening* (Rosenzweig, 2001). Existe também a possibilidade de definir o tipo de câmara usado e a luminosidade e reflexão existente na altura da animação. Os passeios e voos virtuais são uma consequência da animação. Pode mover-se a câmara virtual que observa o modelo ou o próprio modelo 3D (todo o modelo ou apenas algumas partes independentemente). A Figura 4.6 mostra a geometria observada para quatro fotogramas principais que geram uma animação (passeio virtual) à volta de um modelo 3D urbano.

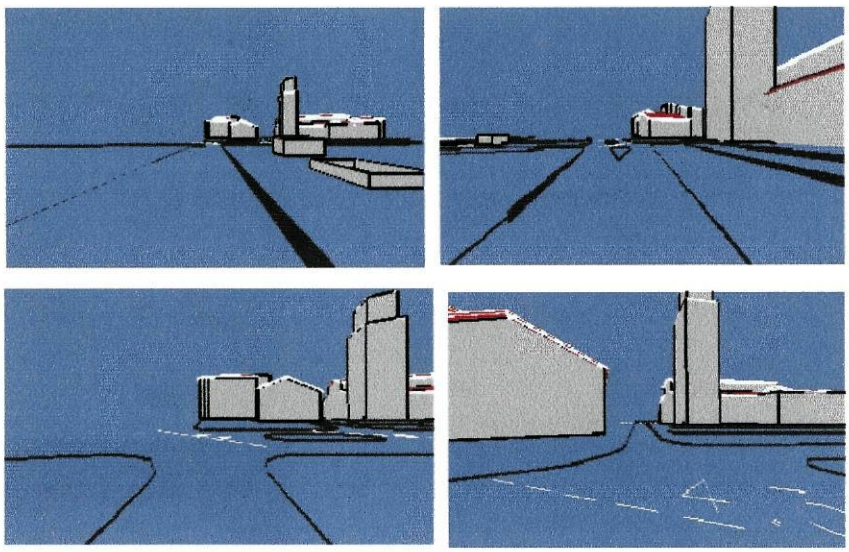


Figura 4.6 – Sequência de quatro fotogramas chave, para um percurso pré determinado, realizado com *Microstation*.

Na Tabela 4.2 encontram-se alguns *softwares* de animação tendo também alguns deles funções de visualização.

Tabela 4.2 – Alguns *softwares* de animação.

Softimage 3D	Poser	Extreme 3D
Cinema 4D	3D Shockwave	Easymodel
Rhinoceros	AC3D	I-Sculpt
Corel Dream 3D	3D Studio Max	Maya
Lightwave	Model Magic 3D	Vue
Bryce	RenderMan	World Builder

Apesar dos pacotes CAD terem sido os primeiros a introduzir a visualização, os pacotes de *software* SIG seguiram-nos de muito perto. Por exemplo, *softwares* como ArcInfo e ArcView introduziram animações e passeios/voos virtuais ligados tanto aos dados gráficos como aos atributos. Na Figura 4.7

pode ver-se o resultado do uso do *software* ArcView/3D Analyst para visualizar, através de voo virtual, a situação existente e os desenvolvimentos propostos para o novo Campus Universitário (Patias, 2001).

Convém referir que o resultados das animações e passeios/voos virtuais podem ser gravados em formatos de filme para depois serem divulgados através de diferentes meios. Os formatos mais conhecidos são o AVI e MPEG.

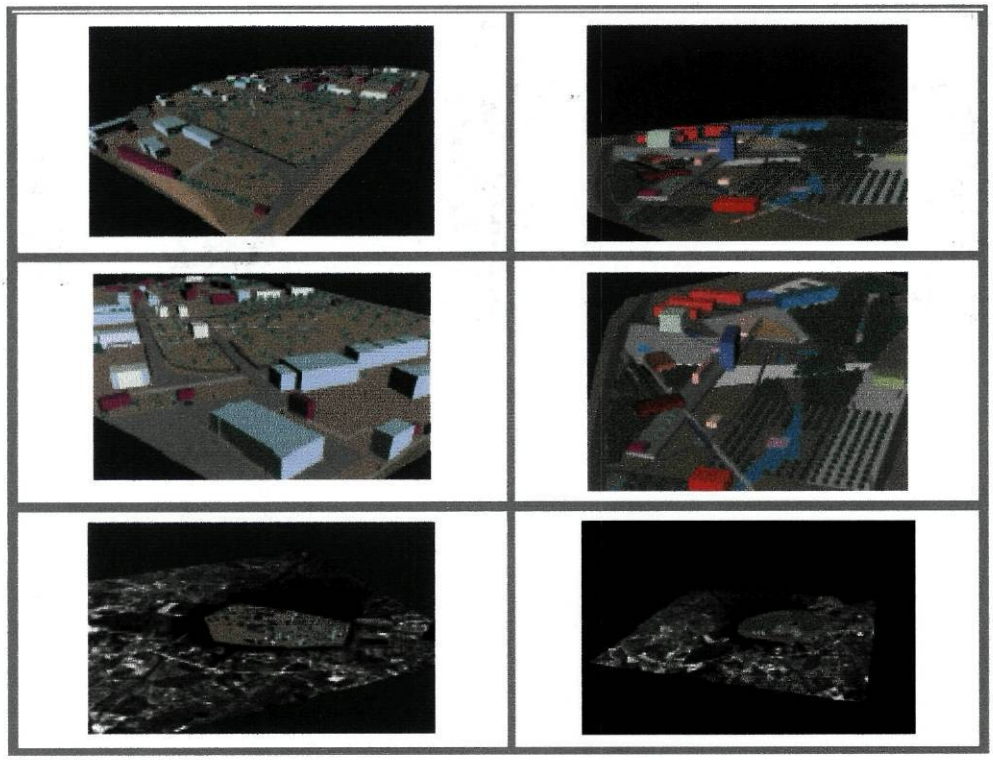


Figura 4.7 – Visualização através de voo virtual sobre situação existente (esquerda) e depois sobre o desenvolvimento proposto (direita), obtida com o *software ArcView*/3D *Analyst* (Patias, 2001).

4.2.2 VRML (*Virtual Reality Modelling Language*) e GEOVRML

A linguagem de descrição VRML e formato de dados associado (URL14) é uma das linguagens mais conhecidas a nível mundial, que permite navegação 3D interactiva e a divulgação de mundos e objectos tridimensionais pela *Internet*. Com a linguagem VRML é possível ligar informação adicional à geometria e textura dos modelos 3D, que pode ser em forma de textos, ou sons, música, filmes e até outras cenas VRML. Esta linguagem permite ainda a especificação dos vários aspectos da visualização do modelo virtual, como a definição da interacção entre o objecto e o utilizador e as animações dos objectos, permitindo ainda associar comportamentos aos objectos 3D modelados. Com todas estas possibilidades, os modelos 3D juntamente com a linguagem VRML têm aplicações nas mais variadas

áreas, nomeadamente na visualização de ambientes interactivos, simulações interactivas para educação, museus virtuais (Dorffner *et al.*, 2000) e todas as aplicações descritas no Capítulo 2. A Figura 4.8 mostra um exemplo de um modelo 3D criado no *Microstation* e exportado para VRML.

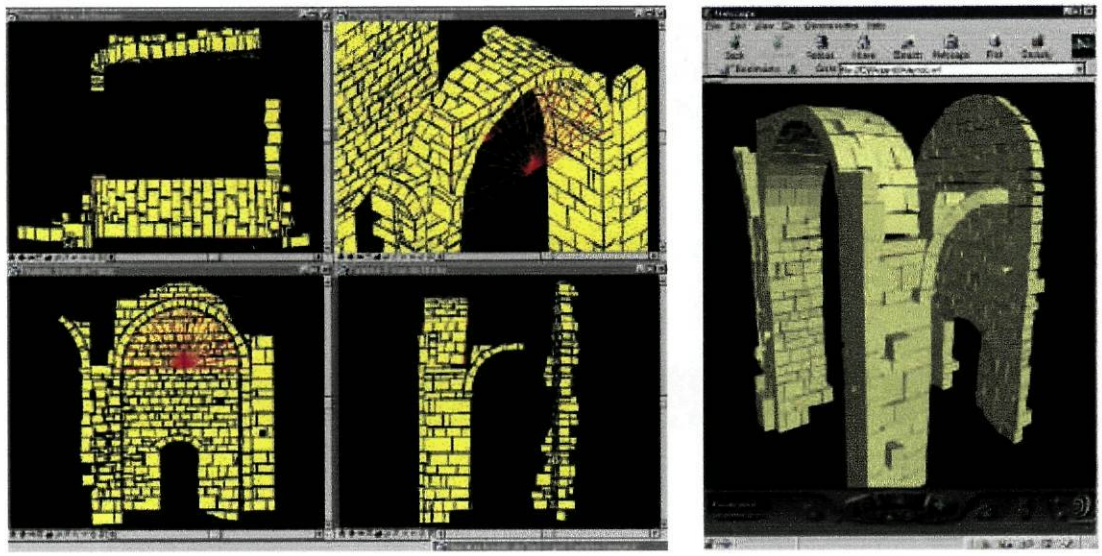


Figura 4.8 – Modelos obtidos em *Microstation* e exportados em VRML (Drap *et al.*, 2000).

O maior impulso para o desenvolvimento da linguagem VRML reporta-se à primeira conferência internacional de WWW, em 1994, onde foi apresentado um protótipo de interface 3D. Foram definidos os requisitos para uma linguagem VRML standard e, em 1995, a *Silicon Graphics Incorporated* (SGI) apresentou o *WebSpace*, o primeiro *browser* VRML (versão 1.0) publicamente disponível. Em 1996 surge uma nova versão (VRML 2.0) com modificações significativas relativamente à anterior que incluiram a adição de áudio, objectos interactivos, comportamentos e argumentos. Ficou conhecido internacionalmente por VRML 97.

O utilizador tem acesso e pode interagir com o modelo 3D criado no formato VRML através de visualizadores da linguagem VRML. Existem vários no mercado, com diferentes interfaces, por exemplo, no que respeita à navegação e análise do objecto e também à maneira como renderizam os modelos. Alguns permitem ao utilizador escolher entre a relação tempo-qualidade (e.g. renderização rápida e baixa qualidade vs. renderização lenta mas de grande qualidade) (Patias, 2001). Normalmente, os processos de navegação mais comuns são:

- Passeio (6 graus de liberdade);
- Passeio "plano": restrição do passeio aos eixos X-Y, subidas e descidas nos eixos Y-Z;
- Voo: iniciar/parar de voar e também acelerar ou desacelerar;
- Modo de análise: usa ferramentas de *rotate* e *zoom*, que podem ser utilizadas para analisar toda a cena, apenas os objectos seleccionados ou ambos.

A Figura 4.9 mostra o modelo virtual da cúpula (Dome) de Hagia Sophia visualizado num *browser* de VRML, onde o utilizador pode interactivamente rodar, manipular e examinar o objecto virtual.

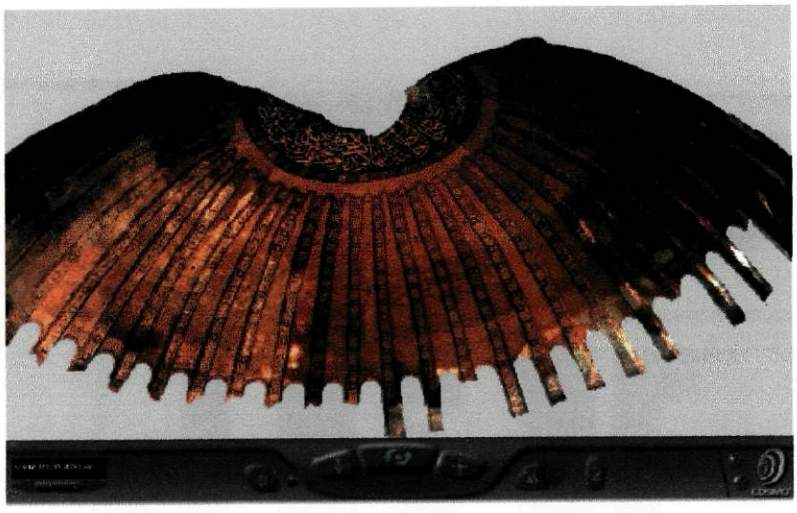


Figura 4.9 – Visualização do modelo virtual da cúpula de Hagia Sophia utilizando como visualizador VRML o *Cosmoplayer* (Dorffner *et al.*, 2000).

GeoVRML é uma linguagem muito parecida com a VRML, mas que tem algumas características especialmente pensadas para a representação de dados tridimensionais geográficos. Fornece, portanto soluções para a representação e visualização de dados geográficos utilizando um visualizador normal de linguagem VRML97 (Patias, 2001). Seguem-se apenas algumas capacidades que são especificamente associadas à linguagem GeoVRML e que são essenciais quando se utilizam dados geográficos. As mais importantes são:

- Sistema de coordenadas: GeoVRML permite a introdução de coordenadas latitude/longitude ou UTM directamente num ficheiro de VRML e o visualizador utiliza esta informação fundindo-a num contexto de visualização global. GeoVRML contém 3 sistemas de coordenadas, 21 elipsóides e 1 geóide.

- Precisão: VRML97 apenas suporta valores de coordenadas de precisão simples, que é insuficiente para representar os dados a grandes escalas, descendo a precisão para valores aproximados dos 10m. GeoVRML fornece soluções que aumentam a sua precisão, conseguindo precisões posicionais maiores que o milímetro, uma vez que a precisão dos pontos passa a ser dupla.

- Metadados: GeoVRML permite especificar um subconjunto de metadados que descrevem os objectos geográficos, incluindo a capacidade de ligação a uma descrição completa dos metadados.

- Animação: é possível efectuar animações definidas entre dois pontos principais (fotogramas principais) na superfície terrestre, pois esta linguagem permite a interpolação entre pontos, dentro do sistema de coordenadas escolhido.

- Introspecção: tem funcionalidades que permitem questionar o sistema e descobrir as coordenadas geográficas de qualquer ponto georeferenciado.

Apesar de todas estas características especiais, existem algumas mais que ainda não fazem parte da GeoVRML, e que são muito importantes quando se trata de dados geográficos, nomeadamente no que se refere a questões temporais, como por exemplo permitir especificar datas nos metadados. Questões relacionadas com a navegação de modelos com coordenadas reais não estão resolvidas. O facto de apenas conter alguns sistemas de coordenadas e apenas o geóide WGS84, limita bastante as aplicações a nível geográfico.

As limitações da GeoVRML prendem-se especialmente com as restrições impostas pela linguagem VRML, pelo que será importante que numa próxima revisão dos standard da VRML estas questões sejam tidas em consideração, para que as melhorias possam também ocorrer na GeoVRML (Patias, 2001).

4.2.3 SISTEMAS DE VISUALIZAÇÃO DE ALTA E BAIXA PERFORMANCE

O *IMAGINE VirtualGIS* (URL15) é um sistema de visualização de alta performance cujo objectivo é permitir a visualização dinâmica, sequências de voo e a administração e assimilação de vários tipos de dados geográficos, em tempo real e em ambiente 3D. Algumas das suas características principais e capacidades que fazem dele um *software* de visualização de alto nível (*high-end*)) são, entre muitas, as apresentadas na Tabela 4.3.

A Figura 4.10 mostra um exemplo da aplicação, onde são visíveis algumas das suas características. Esta ferramenta de visualização, a par com outras de características semelhantes (e.g. *ArcInfo*, 3D *Studio Max* e *ArcView*/3D *Analyst*), não necessita de programação por parte do utilizador, embora seja possível utilizá-la. Estes sistemas conseguem processar um grande conjunto de dados e imagens de grande resolução, estando em desenvolvimento contínuo. O seu objectivo é conseguirem cobrir todas as necessidades de visualização e fornecerem os produtos de visualização usuais. Para além disso,

combinam a visualização com outras funções, de outras áreas que a ela recorrem (e.g. específico para a fotogrametria o sistema *Erdas Virtual* GIS, para a detecção remota o sistema PCI's *Geomatics FLY* e na área dos SIG o sistema *ArcGIS* 8.0) o que os torna muito atractivos e versáteis. São mais utilizados (excepção para o 3D *studio Max*) para a visualização de grandes áreas do que para objectos obtidos por fotogrametria ou varrimento laser terrestres, isto é, pequenos objectos ou objectos isolados (e.g. monumento) (Patias, 2001).



Figura 4.10 – Alguns exemplo de visualização de modelos virtuais no *IMAGINE Virtual*GIS (Patias, 2001).

O *PhotoModeler* e o *ShapeCapture* (URL16) são *softwares* que possuem ferramentas de visualização de baixa performance, que disponibilizam menos produtos de visualização e têm um desempenho mais fraco que as anteriormente referidas. Permitem, normalmente, a visualização de objectos obtidos por técnicas terrestres, mas o seu principal objectivo é a reconstrução de objectos 3D, por meio de processos fotogramétricos descritos no capítulo 2. No entanto, como não são apenas *softwares* para criação de modelos, mas permitem também alguma visualização são aqui referidos.

As características de cada um eles, *ShapeCapture* e *PhotoModeler*, relativamente às capacidades de visualização estão também resumidas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características de visualização dos *softwares IMAGINE VirtualGIS*, *PhotoModeler* e *ShapeCapture* (Patias, 2001).

IMAGINE VirtualGIS	PhotoModeler	ShapeCapture
Renderização dos modelos usando múltiplas resoluções para um rápido desempenho. Possibilidade de renderizar simultaneamente superfícies adjacentes ou sobrepostas. Possibilidade de mostrar os modelos em *wireframe* e também com texturas. Sobreposição de dados vectoriais como pontos, linhas e polígonos ao longo da paisagem. Voos virtuais em tempo real aplicados a dados geográficos tridimensionais. Capacidade de gravar todos os parâmetros de visualização para ficheiros de projecto que possam depois ser usados na criação de filmes. Controlo interactivo do nível de detalhe Exportação dos dados no formato VRML97, DXF (2D e 3D), DirectX, Shapefile e 3DS.	Vista e rotação de cenários complexos e de modelos completamente texturizados. Permite a edição do modelo wireframe. Extrai imagens para as superfícies criadas, removendo-lhe as distorções devidas à perspectiva e ajustando-as às suas formas. Depois podem ser usadas como mapas de texturas em *softwares* de renderização ou serem exportadas como imagens rectificadas. Exporta para DXF (2D e 3D). 3DS, Wavefront OBJ, VRML 1.0/2.0 e DirectX. As texturas reais são também exportadas nos mesmos formatos.	Pode visualizar-se e editar-se o modelo wireframe, útil para remover triângulos indesejados. O modelo pode também ser editado adicionando ou retirando triângulos ao modelo wireframe projectado sobre cada uma das imagens. Uso eficiente de mapeamento de texturas. Por exemplo, só são corrigidas de distorções as imagens que estão muito inclinadas, aquelas com superfícies praticamente paralelas à câmara não são corrigidas. Exporta para VRML 1.0/2.0, DXF, STL e Wavefront OBJ.

4.3 PROBLEMAS E LIMITAÇÕES

As principais limitações e problemas das actuais ferramentas de visualização prendem-se essencialmente com o tamanho do conjunto de dados utilizado que é normalmente muito grande. Este aspecto condiciona grandemente a interacção em tempo real ou mesmo a simples visualização. Deste modo, para visualizar com precisão estes grandes conjuntos de dados complexos é necessário recorrer a *hardware* e *software* com grandes capacidades e recursos (e.g. placa gráfica e processador de alta performance). Este problema tem vindo a ser ultrapassado com a rápida evolução computacional tendo ainda que se resolver o problema da divulgação dos dados e a interacção com a Internet dado que a actual tecnologia das linhas de comunicação que são, por vezes, de baixa velocidade, apresentam dificuldade para conseguir efectuar a distribuição de tão elevado conjunto de dados. Por conseguinte, na última década, a tendência, especialmente da comunidade gráfica, tem sido o estudo de soluções que consigam resolver este problema. Os requisitos principais são (Remondino, 2003): aumento da velocidade de transmissão de grandes modelos geométricos, melhoramento do desempenho da

renderização e visualização e redução do custo de armazenamento e memória sem perda de informação importante.

Normalmente existem dois tipos de informação nos modelos 3D criados, a informação geométrica (i.e. a posição dos vértices e as normais à superfície) e a informação topológica (i.e. conectividade e relações entre faces). É baseado nestas duas informações que são desenvolvidos os algoritmos de compressão de dados que permitem suplantar alguns dos problemas de manuseamento de grande quantidade de dados. Para detalhes sobre metodologias de compressão deste tipo de dados ver Hoppe (1997), Reddy (1999) e Remondino (2003).

No âmbito dos problemas e limitações relativamente às ferramentas de visualização, salienta-se ainda a grande dificuldade existente na tradução e intercâmbio de dados 3D entre os *softwares* de modelação e os de visualização. A Tabela 4.4 apresenta alguns dos formatos 3D mais comuns.

Tabela 4.4 – Formatos de dados 3D mais comuns (Remondino, 2003).

3DS	VRML	Lightwave
Solid Works	OpenFlight	DXF
Inventor	Aplle 3DMF	IGES
DirectX	Adobe Illustrator	Cinema 4D
Maya	Shockwave	Wavefront OBJ/MTL

Cada pacote de *software* de modelação tem os seus próprios formatos de dados. Mesmo quando permite a exportação de dados noutros formatos, estes não são directamente importados por outros *softwares*. Usualmente, o único formato que existe para a exportação de dados é o DXF, que não reconhece texturas, requer grande capacidade de armazenamento e produz muitas vezes consideráveis erros (Remondino, 2003). Apesar da existência de alguns conversores específicos (e.g. PolyTrans (URL17) e 3Dwin (URL18)), continua a haver a necessidade de uma standarização dos formatos 3D, para que fique facilitado o intercâmbio de modelos. Como já foi referido, o formato VRML é um dos exemplos de standarização de formatos 3D especialmente para trocas de modelos na *Internet*.

Um pacote completo de visualização e com uma certa qualidade deve ter a possibilidade de importar, visualizar e exportar diferentes formatos de dados 3D (Tabela 4.4) bem como dados de texturas de imagem.

5

CASO DE ESTUDO

Este capítulo tem como objectivo a descrição do trabalho prático efectuado no âmbito do estudo sobre a "Elaboração de um Arquivo Arquitectónico inserido num Modelo Tridimensional Urbano". A introdução ao trabalho realizado é efectuada através da apresentação dos objectivos, da área de estudo e dos recursos utilizados, nomeadamente a instrumentação, o *software* e os dados necessários em cada uma das fases. Procede-se posteriormente à descrição das etapas para a aquisição de dados e criação do arquivo arquitectónico e do modelo tridimensional urbano. A aplicação de algumas técnicas de visualização, nomeadamente técnicas multimédia é também apresentada como complemento do restante trabalho. Os resultados ou produtos obtidos em cada uma das fases são apresentados no final da respectiva secção.

5.1 OBJECTIVOS

O objectivo principal do caso de estudo consiste na elaboração de um arquivo arquitectónico recorrendo a técnicas fotogramétricas, contribuindo assim para a divulgação destas como um meio excelente de registo e protecção do património. Do arquivo arquitectónico fazem parte, para além das fotografias adquiridas e pontos de controlo, outros elementos como os alçados das fachadas e o modelo 3D vectorial e renderizado dos monumentos. O modelo tridimensional urbano da envolvente aos monumentos em estudo é criado como complemento do arquivo arquitectónico, possibilitando uma caracterização geral da zona, bem como uma visualização mais abrangente.

A concretização do objectivo principal do caso de estudo baseia-se na utilização de duas técnicas fotogramétricas com princípios de implementação distintos levando à comparação em termos de performance e precisão, entre a fotogrametria convergente monoscópica multi-imagem e a fotogrametria estereoscópica utilizando *softwares* específicos de cada abordagem e diferentes câmaras para a aquisição das fotografias (Tabela 5.1). Vantagens e desvantagens de ambas as metodologias são também indicadas.

O trabalho é concluído com a criação de um CD multimédia contendo toda a informação relevante sobre o monumento, inserido no modelo tridimensional urbano criado para o efeito. O CD tem como objectivo a divulgação dos seus elementos arquitectónicos, históricos e paisagísticos.

Tabela 5.1 – Estudos comparativos a efectuar com base nas diferentes câmaras (MA – métrica analógica, MD – métrica digital, NMA – não métrica analógica, NMD – não métrica digital) e diferentes técnicas utilizadas (Método E – método estereoscópico, Método M – método monoscópico).

	MA Método E	**MD Método E**	**MA Método M**	**MD Método M**	**NMA Método M**	**NMD Método M**
MA Método E		●	●	●	●	●
MD Método E			●	●	●	●
MA Método M				●	●	●
MD Método M					●	●
NMA Método M						●

5.2 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Foram seleccionadas as Igrejas Matriz de Ponta Delgada e Oeiras para a elaboração do arquivo arquitectónico e do modelo 3D urbano, devido ao interesse demonstrado por entidades locais e pela facilidade de acesso aos dados necessários à concretização do estudo.

Segue-se uma breve descrição dos monumentos estudados (Figuras 5.1 e .5.2), para salientar que as suas características são dignas de pertencer ao património histórico de nosso País, pelo que, criar um arquivo arquitectónico de cada uma delas será, sem dúvida, uma mais valia para a cultura arquitectónica de Portugal.

Relativamente ao modelo tridimensional urbano, o tecido urbano de ambas as cidades, embora com características diferentes, é bastante complexo, sendo constituído por edifícios cuja morfologia dos telhados é difícil de interpretar através da fotografia aérea (Figura 5.3), o que dificulta bastante a restituição dos mesmos. Em muitas situações torna-se necessário fazer generalizações dado que existem pormenores nos telhados dos edifícios que não se tornam importantes para o modelo 3D urbano.



Figura 5.1 - Igreja Matriz de Oeiras.

A Igreja Matriz de Oeiras, situada na zona antiga de Oeiras, localiza-se num ponto estratégico, dominando o centro da Vila e o cenário envolvente. Existem referências a esta Igreja desde o séc. XVI, como templo antigo, de dimensões mais modestas e também de invocação à Nossa Senhora da Purificação. Foi no entanto, no séc. XVIII que tiveram início as obras de ampliação e reconstrução da nova capela-mor. A fachada principal contém duas torres sineiras adossadas ao corpo central por um frontão triangular e pormenores neo-clássicos de grande interesse. Embora a fachada apresente valores simétricos de volumetria é no seu interior que se revela a riqueza deste templo barroco.



Figura 5.2 - Igreja Matriz de Ponta Delgada

A Igreja Matriz de S. Sebastião foi construída no Sec. XVI, no centro da então Vila de Ponta Delgada na Ilha de S. Miguel, no local de uma antiga ermida de invocação ao mártir.

Esta construção foi iniciada com o apoio do povo, em honra de S. Sebastião, assim dando graças pela cura da peste que assolou Ponta Delgada, entre 1523 e 1531, tendo as obras sido dadas por concluídas em 1545. O estilo arquitectónico seguiu o gosto gótico mendicante português, com planta rectangular de três naves suportadas por colunas unidas por arcos de volta inteira, separados do altar-mor por um falso transepto e completadas por duas capelas laterais.

Ainda hoje se observam elementos decorativos originais com conFigurações angélicas e exóticas, incluindo intervenções com motivos heráldicos, náuticos e geométricos, em delicado rendilhado escultórico. Na construção de alguns arcos, abóbadas de nervuras e dos portais da fachada principal assim como dos lados norte e sul, utilizou-se pedra vulcânica das Ilhas e mármores vindos do continente.

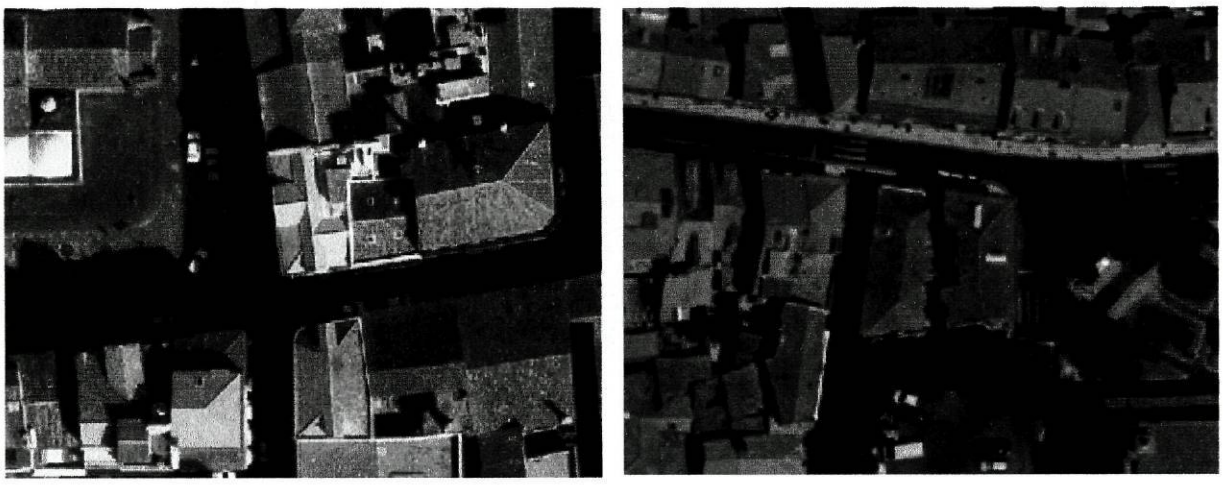


Figura 5.3 – Exemplo do tecido urbano das cidades de Ponta Delgada (esquerda) e de Oeiras (direita).

5.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Para a elaboração do arquivo arquitectónico e do modelo tridimensional urbano são efectuadas várias tarefas, distribuídas por três fases diferentes mas sempre ligadas entre si: a fase de preparação, a fase de processamento e a de pós-processamento (Figura 5.4).

Como fase de preparação entende-se todas as etapas necessárias para a aquisição dos dados indispensáveis à obtenção do produto final. Na fase de processamento efectuam-se as orientações das fotografias, a restituição e a edição dos dados obtidos na fase de preparação de forma a obter os alçados das fachadas dos monumentos em estudo e os modelos tridimensionais do mesmo e sua envolvente. A fase de pós-processamento consiste na avaliação da informação extraída de forma a corrigir erros, completar partes omissas e calcular estatísticas para avaliação da precisão.

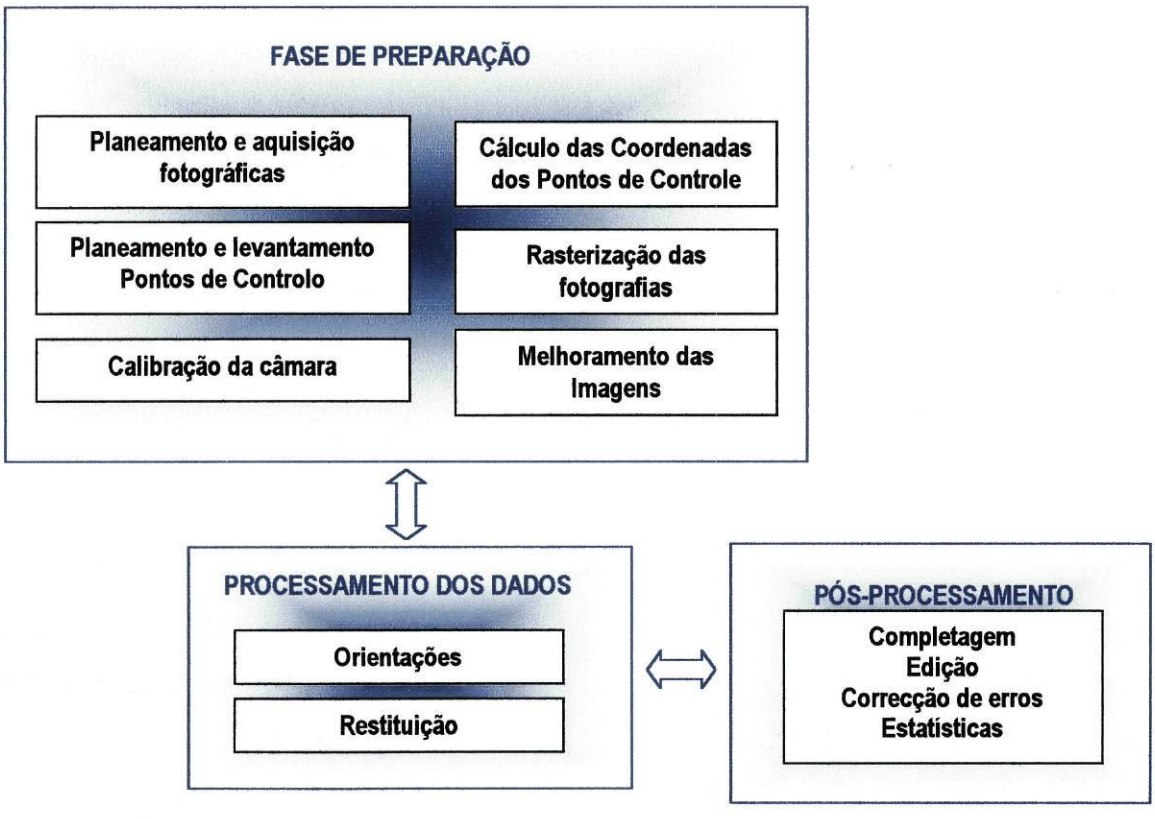


Figura 5.4 – Resumo das etapas necessárias para a criação do arquivo arquitectónico e modelo 3D urbano.

A fase final do trabalho refere-se à utilização de várias ferramentas de visualização, por forma a divulgar os elementos do arquivo arquitectónico inserido no modelo tridimensional da sua área envolvente.

Os meios utilizados na elaboração do trabalho, quer a nível instrumental quer a nível de *software*, são apresentados resumidamente na secção 5.3.2. São também referidos, na secção 5.3.1, os dados de

entrada que permitem a inicialização do trabalho bem como os produtos resultantes após a extracção de informação.

5.3.1 DADOS E PRODUTOS RESULTANTES

Os dados básicos para a realização do arquivo arquitectónico são imagens ou fotografias rasterizadas(convertidas à forma digital com um *scanner* (5.3.2)) consoante foram adquiridas por câmaras digitais ou analógicas Para a Igreja de Ponta Delgada foram adquiridas fotografias com as câmaras métricas enquanto que para a Igreja de Oeiras foram adquiridas fotografias com as quatro câmaras disponíveis (5.3.2).

Para a análise dos resultados foram levantados pontos de controlo nas fachadas dos edifícios, por métodos topográficos de precisão, cujas coordenadas servem para efectuar comparações com as coordenadas obtidas com as diferentes imagens e metodologias de processamento da informação, i.e., fotogrametria convergente monoscópica e fotogrametria estereoscópica (caso normal). Esta comparação foi efectuada apenas com dados da Igreja de Oeiras.

No que respeita aos dados necessários para a elaboração do modelo tridimensional urbano, estes consistiram nas fotografias aéreas e respectivo controlo, gentilmente cedidos pelas entidades locais responsáveis pela cartografia das respectivas cidades.

Quanto aos elementos do arquivo arquitectónico, os próprios dados de entrada constituem uma componente essencial ou até única do mesmo, independentemente do seu posterior processamento, podendo vir a ser utilizados em qualquer altura em que venha a ser pertinente recorrer ao registo métrico correspondente à época em que foram adquiridos os dados em questão.

Os elementos resultantes incluem o arquivo arquitectónico produzido com as diferentes imagens e as diferentes técnicas, do qual fazem parte, como referido, as próprias fotografias e pontos de controlo, e também os alçados das fachadas à escala 1:100, o modelo 3D vectorial de pormenor e o modelo 3D renderizado do monumento, além do modelo tridimensional urbano da zona. Efectuou-se ainda a análise dos resultados da informação extraída para comparação, em termos de precisão, entre os diversos sistemas de aquisição de dados e os métodos de processamento dos mesmos.

5.3.2 RECURSOS

Os recursos utilizados dizem respeito ao *software* e instrumentação utilizados para a elaboração do arquivo arquitectónico e modelo 3D, bem como para a análise de resultados, encontrando-se listados nas Tabelas 5.2 e 5.3 respectivamente.

Tabela 5.2 - Instrumentação e *software* utilizados.

Tarefa	Instrumentação (ver tabela 5.4 para detalhes)	Software
Arquivo Arquitectónico Modelo 3D urbano Visualização Análise dos resultados	Câmaras fotográficas *Scanner* Estação fotogramétrica Estação total	Calibração de câmaras – *Camera Calibrator* 4.0 Processamento de imagem: *Image Analyst e PhotoShop* Fotogrametria convergente monoscópica: *PhotoModeler* 4.0 Edição: *AutoCad* Fotogrametria estereoscópica: *ImageStation* SSK PRO Modelação geométrica: *MicroStation* Visualização: *Microstation, Cosmoplayer, Macromedia Director* Cálculo de coordenadas dos pontos de controlo: *AutoDesk Land Development* Testes estatísticos: *Excel*

Como se pode ver na Tabela 5.3 foram utilizadas quatro câmaras fotográficas: Rollei D7 Metric5 métrica e digital, Leica R5 semi-métrica analógica (com a réseau incorporada), além das não métricas Nikon Coolpix 775 digital e Leica R8 analógica.

O *scanner* Epson 1640XL foi utilizado para rasterizar os negativos das fotografias obtidas com as câmaras analógicas.

Os pontos de controlo foram adquiridos com a Estação Total Sokkia cujas principais características se encontram também na Tabela 5.4.

No que respeita à estação fotogramétrica utilizada, para além das características necessárias para proceder à restituição estereoscópica, tem capacidade de memória suficiente para o rápido processamento e armazenamento de dados, tendo em consideração o seu elevado volume.

O *software Camera Calibrator* 4.0 foi utilizado na calibração das câmaras Nikon e Leica R8, com o fim de providenciar informação sobre as características internas das câmaras (5.4.1). Para facilitar a

análise comparativa, no caso do método monoscópico, efectuou-se também a calibração com o referido *software*, das câmaras Rollei e Leica R5, apesar de se encontrarem disponíveis os respectivos certificados de calibração.

Tabela 5.3 – Detalhe da instrumentação utilizada.

Instrumentos	Marca Modelo	Distância focal (mm)	Tamanho do Pixel (μm)	Formato da imagem (mm)	Resolução (pixels)
Câmara digital métrica	Rollei D7Metric	7,5 (≈28)	3,5	8,9×6,7	2552×1920
Câmara digital não métrica	Nikon Coolpix 775	7,69 (≈28)	4,5	6,8×5,1	1600×1200
Câmara Analógica semi-métrica	Leica R5 (Elcovision)	35	15 (depois de rasterizada)	36×24	2445×1583
Câmara Analógica não métrica	Leica R8	28	20 (depois de rasterizada)	36×24	1800x1200

Instrumento	Marca	Resolução geométrica (ppp)	Modelo	Resolução Radiométrica (bits) (interna/externa)
Scanner	Epson	1600×3200	1640XL	42/42

Instrumento	Marca Modelo	Resolução linear	Resolução angular	Características específicas
Estação Total	Sokkia Set 600	2mm ± 2ppm	5"	distanciómetro laser que permite a leitura de pontos sem a necessidade de utilização de um prisma reflector.

Instrumento	Marca Modelo	Características específicas
Estação fotogramétrica	ImageStation SSK	Monitor, placa gráfica e rato 3D específicos, óculos de cristais LCD e emissor de infravermelhos – preparado par a estéreo-restituição.

Segue-se uma breve descrição genérica dos dois *softwares* que foram usados na extracção de informação: o *ImageStation* SSK para a fotogrametria estereoscópica e o *PhotoModeler* 4.0 para a fotogrametria convergente monoscópica.

a. IMAGESTATION SSK

O conceito de Estação Fotogramétrica Digital (EDF), no qual o *software* em estudo se inclui foi anteriormente introduzido em 2.3.4.4. Seja qual for a concepção e o fabricante das estações fotogramétricas digitais, estas têm um determinado número de funcionalidades e componentes básicas que são essenciais para efectuar todas as etapas do processo fotogramétrico, quer para restituição quer para a produção de ortofotos ou produção de modelos digitais de terreno (MDT). Do *hardware* básico distinguem-se os sistema de visualização e de medição 3D:

- **Sistema de visualização 3D**: esta é a componente que distingue, normalmente, as EFD das outras estações gráficas. Deve permitir visualizar um modelo fotogramétrico confortavelmente e a cores. Para que o operador possa ver estereoscopicamente, as imagens esquerda e direita têm de ser separadas.

- **Sistema de medição 3D:** este sistema é utilizado para que se possam efectuar medições em estereoscopia e é constituído normalmente por um rato especial *track-ball* com diversas funções, entre elas a funcionalidade de *roaming* (movimento do cursor ou imagem nas três direcções X, Y e Z).

Apesar de se poderem efectuar algumas operações fotogramétricas monoscopicamente, uma das funcionalidade mais importante das EFD é permitirem a visão estereoscópica, uma vez que esta permite não só medições muito precisas, mas também interpretar e portanto escolher pontos pertinentes a medir para uma adequada representação do modelo 3D.

No que diz respeito ao *software* propriamente dito, as equações em que se baseiam são as mesmas que são utilizadas na fotogrametria analítica. A principal diferença reside no facto de, tendo-se a imagem digital, ser possível automatizar as várias etapas, nomeadamente as orientações das imagens. No que respeita à vectorização tridimensional, os sistemas estão ligados normalmente a *softwares* CAD, possuindo uma série de funcionalidades que permitem a geração de desenhos ou de modelos digitais de superfície, com variadas perspectivas, de um modo prático, interactivo e mais ou menos automático, usufruindo-se também das potencialidades de modelação e renderização desses *softwares*.

O *software ImageStation SSK* é constituído por vários módulos, cada um com funções diferentes na fase de processamento de dados. Neste trabalho são utilizados os seguintes:

- ***ImageStation Raster Utilities* (ISRU)** onde se efectua o processo de criação de pirâmides da imagem (*overviews*), para um processamento mais rápido e eficaz, essencial nos processos de medição automática.

- ***ImageStation Digital Mensuration* (ISDM)** que permite a criação do projecto, a atribuição da câmara e das fotografias utilizadas, bem como efectuar a sua orientação, permitindo também a geração das imagens epipolares.

- ***ImageStation Stereo Display* (ISSD)** é um módulo que permite a visualização estereoscópica e a manipulação das imagens em 3D. Este módulo corre sobre uma plataforma CAD, neste caso o *MicroStation*, permitindo o aproveitamento das funcionalidades deste *software*. É, portanto, com este módulo que se efectua a restituição para a obtenção do produto final.

b. PhotoModeler 4.0

Este *software* tem sido vastamente utilizado em projectos de medição e modelação, na geração de modelos 3D para visualização e estudos de perspectivas e na criação de desenhos altimétricos das estruturas existentes, bem como das fachadas. Este *software* permite ainda a obtenção de imagens rectificadas das fachadas e também a obtenção de modelos 3D renderizados com as mesmas (fotorealismo), permitindo, por exemplo, a realização de passeios virtuais, pelos edifícios. É um *software* com uma interface amigável, cujos principais passos para a realização de um projecto, após a aquisição de dados base, são:

- Importação das imagens para o *software*;

- medição nas imagens de pontos e linhas representativos das características importantes do objecto, utilizando ferramentas que permitem efectuar a sua marcação;

- orientação das fotografias umas relativamente às outras pela marcação dos pontos e linhas homólogos aos anteriormente marcados, nas diferentes fotografias que os contêm;

- processamento das fotografias e pontos aí marcados e, se necessário da câmara (auto calibração) para produzir o modelo 3D;

- visualização do resultado do modelo 3D no 3D *Viewer* (visualizador tridimensional) e análise dos resíduos encontrados pelo método de ajuste por feixes;

- orientação absoluta do modelo 3D utilizando pontos de controlo ou medição de uma distância do objecto obtida no terreno (*free adjustment network*);

- extracção de coordenadas, distâncias e áreas;
- exportação dos dados tridimensionais para *softwares* de renderização, animação ou CAD.

O *PhotoModeler* tem algumas vantagens, tanto do ponto de vista externo (interface e potencialidades) como do ponto de vista interno (algoritmos de processamento de dados). Relativamente ao primeiro aspecto destaca-se o facto de permitir um manuseamento muito rápido e eficaz das imagens, de mostrar um relatório com as coordenadas de todos os pontos, permitir uma visualização dinâmica e interactiva do modelo, possibilitar a exportação em variados formatos 3D, permitir a extracção de texturas das imagens com os dados do modelo e a produção de imagens rectificadas. No segundo caso é de salientar o eficiente ajuste por feixes baseado nas equações de colinearidade, a possibilidade de auto calibração da câmara, a possibilidade de medição de pontos, arestas, curvas e cilindros em 2D e 3D pela criação de superfícies e a possibilidade de introdução de condições que ajudem a fortalecer a solução, incluindo a utilização de pontos de controlo.

5.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados é uma fase fundamental na criação, por processos fotogramétricos, dos arquivos arquitectónicos e modelos tridimensionais urbanos, consistindo basicamente na obtenção de fotografias e respectivo controlo. Associada a esta fase encontram-se um determinado número de factores a ter em consideração, nomeadamente em relação ao equipamento e metodologia a utilizar que por sua vez estarão relacionados com o tipo de problema a resolver.

Neste trabalho apenas foi necessário efectuar a aquisição de dados para a elaboração do arquivo arquitectónico, pois os dados para a elaboração do modelo 3D urbano foram fornecidos por entidades locais. Deste modo, no que se segue fala-se somente na aquisição de dados respeitante à criação dos arquivos arquitectónicos, começando por referir o processo de calibração das câmaras e continuando com o planeamento e aquisição das fotografias e pontos de controlo.

5.4.1 CALIBRAÇÃO DAS CÂMARAS FOTOGRÁFICAS

Para a execução deste trabalho foi necessário calibrar as câmaras, uma vez que as suas características físicas e ópticas têm de ser quantificadas com precisão, para que não fique comprometido o desempenho do PhotoModeler, (Martins, 1998; Pappa, 2001, Fedak, 2001). Este *software* contém um módulo de calibração – *Camera Calibrator* 4.0 – que permite estimar os

parâmetros internos da câmara, com o auxilio de uma grelha constituída por um padrão repetido - conjunto de linhas e colunas formadas por triângulos brancos e pretos, cuja razão base/altura é 1,5 (Figura 5.5). Estes triângulos estão dispostos por forma a poder ser utilizado um algoritmo de correlação automática de imagens (Gomes Pereira, 1996) para a medição dos pontos. Possui ainda três círculos em cada canto da grelha, cujo centro do triângulo por eles formado serve de ponto de controlo para o processo, sendo também necessário medir a distância entre dois desses pontos.

Para a calibração das câmaras a grelha foi imprimida, à escala (mantendo a relação base/altura igual a 1,5), a partir do *software Microstation*, numa folha de formato A0. Verificando-se a dificuldade em manter o papel com a grelha colado numa parede devidamente esticado de forma a não ter deformações, optou-se por mandar fazer um painel com a grelha imprimida e devidamente esticada, evitando-se, deste modo, as deformações inerentes ao papel e à sua colocação numa parede.

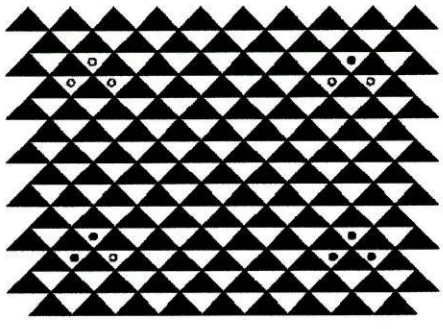


Figura 5.5 – Grelha de calibração com padrão repetido.

O processo de calibração começa com a aquisição de várias fotografias da grelha, com a câmara em diversas posições, de forma a que apresentem uma boa convergência de raios para cada um dos pontos da grelha. Neste caso foram adquiridas oito fotografias (Figura 5.6), quatro tiradas do lado esquerdo e quatro do lado direito: em posição vista de cima, do centro e de baixo; na posição central obtiveram-se ainda duas fotografias rodando-se a câmara de 90°, como aconselhado pelo manual do *software*. É muito importante que os pontos de controlo sejam bem visíveis em todas as fotografias

Durante o processo de ajustamento por feixes, o *software* calcula então os parâmetros internos da câmara, com base na medição dos pontos de controle e de uma distância conhecida (entre o ponto de controlo do canto superior esquerdo e o do canto inferior direito), assim como da leitura automática dos vértices dos triângulos.

No caso de câmaras de filme, é necessário, antes de efectuar as medições dos pontos de controlo e dos pontos da grelha, medir as marcas fiduciais em cada uma das fotografias. 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 pixels cuja geometria é rígida e bem definida.

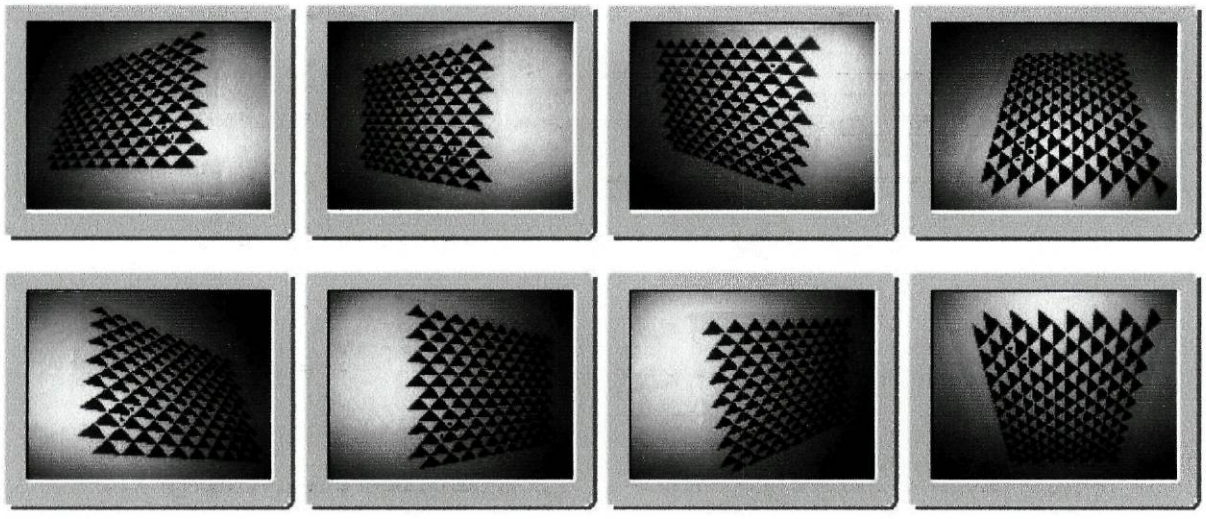


Figura 5.6 – Imagens adquiridas para o processo de calibração da Rollei.

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores obtidos através do processo de calibração das câmaras digitais e analógicas, ou seja, os parâmetros de orientação interna, que serão posteriormente utilizados pelo *PhotoModeler*. No *ImageStation* SSK, e no caso das câmaras métricas, serão usados os parâmetros de calibração fornecidos no relatório de calibração.

Com os valores (parâmetros de calibração) obtidos pelo processo de calibração acima mencionado é possível traçar os gráficos de distorções correspondentes. Assim, a Figura 5.7 ilustra as curvas de distorção radial das lentes para as quatro câmaras fotográficas utilizadas neste trabalho.

Tabela 5.4 – Parâmetros de orientação interna das câmaras obtidos através do *software Calibrator* 4.0.

CÂMARA	DIST. FOCAL (mm)	FORMATO (mm^2)	PONTO PRINCIPAL (mm)	DISTORÇÃO DAS LENTES		TAMANHO DA IMAGEM (pixels)
				Radial	Tangencial	
Leica R8	28,08	36 x 24	X = 17,9309 Y = 11,9057	K_1 = 0,0002322 K_2 = -3,40e-007	P_1 = 3,721e-005 P_2 = 6,03e-005	1800 x 1200
Nikon	7,69	6,78 x 5,08	X = 3,3839 Y = 2,4936	K_1 = 0,001536 K_2 = 0,0002855	P_1 = -0,0003994 P_2 = -6,812e-006	1600 x 1200
Leica R5	35,43	36 x 24	X = 18,0116 Y = 11,9492	K_1 = 2,306e-005 K_2 = 3,867e-008	P_1 = 1,952e-005 P_2 = -7,018e-005	2445 x 1583
Rollei	7,533	8,90 x 6,70	X = 4,3628 Y = 3,7214	K_1 = 0,002266 K_2 = -4,485e-005	P_1 = 2,026e-005 P_2 = 0,0001006	2552 x 1920

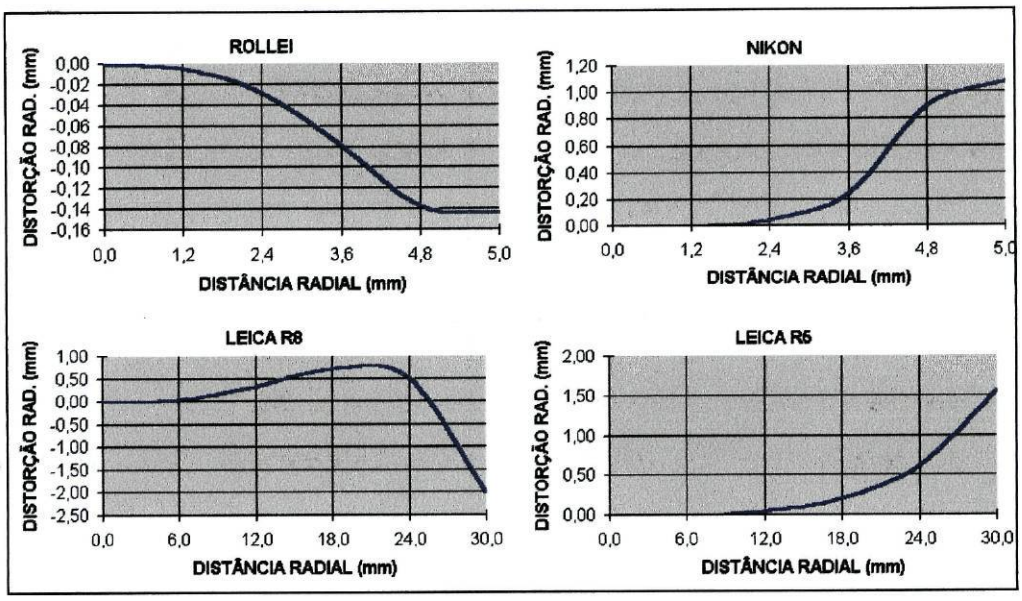


Figura 5.7 - Curvas de distorção das lentes desenhadas com os parâmetros obtidos pelo *software Calibrator* 4.0 e para as quatro câmaras.

Na Tabela 5.5 podem visualizar-se os parâmetros de calibração fornecidos pelo relatório do fabricante para as câmaras métrica e semi-métrica.

Tabela 5.5 – Parâmetros de orientação interna das câmaras providenciados no certificado de calibração das câmaras Rollei e Leica R5 (Elcovision).

CÂMARA	DISTÂNCIA FOCAL (mm)	FORMATO (mm^2)	PONTO PRINCIPAL (mm)	DISTORÇÃO DAS LENTES		TAMANHO DA IMAGEM
				Radial	Tangencial	
Leica R5	34,9615	36 x 24	X = 0,1370 Y = 0,1190	K_1 = -0,547e-004 K_2 = 0,609e-007	- -	1800 x 1200
Rollei	7,49	8,9×6,7	X = -0,06 Y = -0,38	K_1 = -0,1796e-003 K_2 = 3,869e-005	- -	2552 x 1920

Na Figura 5.8 encontram-se representadas as curvas de distorção para as câmaras Leica R5 e Rollei, desenhadas de acordo com os parâmetros do certificado de calibração que acompanha as mesmas.

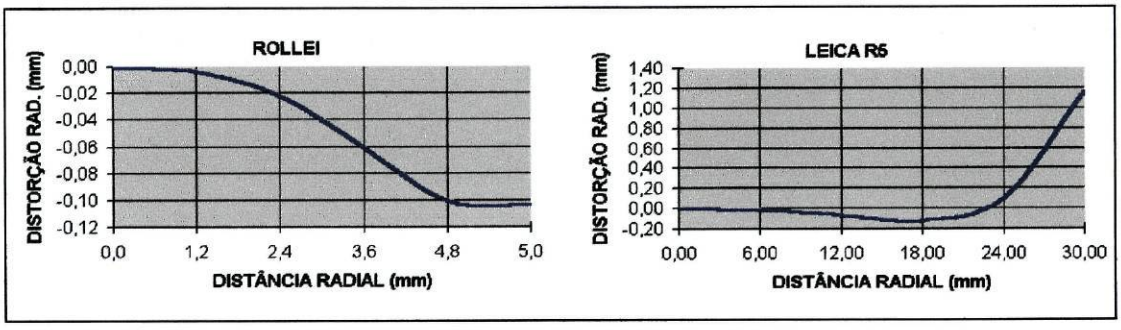


Figura 5.8 - Curvas de distorção das lentes das duas câmaras métricas utilizando os valores fornecidos no relatório de calibração do fabricante.

Para a análise das curvas de distorção deve-se ter em consideração que as dimensões das imagens obtidas com câmaras digitais não são comparáveis em termos absolutos com as câmaras de filme, por conseguinte os valores das distorções das câmaras analógicas surgem com valores superiores, dado o tamanho da imagem ser maior e as distorções também o serem para os cantos da imagem.

Como se pode ver pelas figuras 5.7 e 5.8, os parâmetros de calibração providenciados nos certificados dos fabricantes e aqueles que foram obtidos através do *software Calibrator* 4.0, não apresentam diferenças significativas no caso da câmara Rollei, enquanto que no caso da Leica são mais evidentes. Tal facto poderá ser justificado por o relatório de calibração desta ultima ser mais antigo, podendo ser necessário a sua actualização. Para além disso, tem de se ter presente a possibilidade da introdução de distorções pelo *scanner*, uma vez que as fotografias obtidas com as câmaras analógicas (Leica R8 e Leica R5) tiveram que ser rasterizadas. Este facto significa que existe a possibilidade de acumulação e/ou introdução de erros provocados pelo *scanner* na imagem utilizada na calibração e que afectem os parâmetros da distorção das lentes. Isto implica que o *scanner* deva ser calibrado.

De acordo com os resultados obtidos pelo *software Calibrator* 4.0, e pela análise dos respectivos gráficos sobre as distorção das lentes das câmaras calibradas, conclui-se que, entre as câmaras digitais a que apresenta distorções mais elevadas é a câmara Nikon não métrica. As suas distorções são bastante mais elevadas do que as da Rollei, como seria de esperar. Tal aconteceu também no caso das câmaras analógicas, a câmara Leica semi-métrica apresenta distorções inferiores à Leica R8 não métrica.

5.4.2 PLANEAMENTO E AQUISIÇÃO DAS FOTOGRAFIAS/IMAGENS

O planeamento da cobertura fotográfica das Igrejas é um processo importante uma vez que permite ter uma noção abrangente do que se vai fazer no local reduzindo o tempo a despender na aquisição da fotografia e até mesmo evitando a sua repetição mais tarde. Para além disto, o bom funcionamento dos processos seguintes estão fortemente ligados à qualidade das fotografias, a qual depende do planeamento e aquisição das mesmas.

Para que o planeamento possa ser parcialmente efectuado em gabinete é necessário ter alguma informação sobre o monumento, nomeadamente as suas dimensões e também sobre a sua envolvente para saber a que distância se pode colocar a câmara. Estes dados podem ser obtidos se houver fotografias aéreas actualizadas da zona de estudo ou cartas topográficas. Neste caso teve-se acesso a essa informação, havendo, no entanto, o inconveniente de alguns imprevistos devido à sua desactualização.

A aquisição das fotografias para cada uma das técnicas, i.e. fotogrametria estereoscópica e fotogrametria monoscópica convergente é feita de maneira diferente, uma vez que a filosofia de funcionamento é distinta para cada uma delas. Deste modo, descreve-se separadamente cada um dos planeamentos efectuados.

Em ambos os casos teve-se em atenção a escala requerida para o arquivo arquitectónico – 1:100 – o que implica que a escala da fotografia varie entre 1:400 e 1:600 (factor de ampliação entre 4 e 6, em geral utilizado na prática (2.3.3)) e que, conjuntamente com a distância focal das câmaras utilizadas, condiciona todos os restantes parâmetros do planeamento fotográfico.

5.4.2.1 FOTOGRAMETRIA ESTEREOSCÓPICA

O planeamento das fotografias é feito tendo em conta uma geometria de aquisição muito semelhante à do caso normal (2.3.3.1), sendo por isso necessário calcular o comprimento da base, B, para a colocação das câmaras.

Como já foi referido, a escala da fotografia pretendida é 1:400 (até 1:600) e a distância focal (**c**) das câmaras utilizadas é de respectivamente 28 mm, para a câmara digital, e 35 mm para a analógica. Convém referir que, relativamente à câmara digital, a distância focal é na realidade de aproximadamente 7,5 mm, que quando convertida ao correspondente de uma câmara analógica com fotografia de dimensões 36x24 mm corresponde a 28mm.

Os parâmetros essenciais ao planeamento da aquisição das fotografias encontram-se listados na Tabela 5.6, para a Igreja de Oeiras. O plano fotográfico (Figura 5.9) foi feito em gabinete recorrendo a uma planta topográfica simples da área de estudo e aos referidos parâmetros.

Convém salientar que, devido à escala fotográfica imposta à partida e à relação entre a base e a distância câmara-objecto (considerou-se o valor 0,15), a largura do objecto não pode ser totalmente abrangida para o caso de fachadas com largura superior a 12 m (cobertura do modelo), sendo por isso necessário recorrer a vários modelos. No que diz respeito à aquisição de fotografias tendo em atenção a altura da fachada (cerca de 23 metros) e o tamanho da imagem em altura (de 24 mm), apenas são abrangidas pela fotografia cerca de 10 metros, pelo que seria necessário recorrer, por exemplo, a gruas, para poder manter a relação entre a base e a distância ao objecto e o paralelismo relativo à fachada.

Tabela 5.6 – Planeamento da cobertura fotográfica da Igreja de Oeiras tendo em consideração a escala 1:400 e as câmaras digital e analógica métricas.

Igreja	Câmaras	Fachada	Largura (m)	Distância ao objecto (m)	Comprimento da base (m)	Cobertura do modelo (m)	Nº. de pares
Oeiras	Câmara Digital	1	24,88	11,200	1,70	12,30	3
		2	31,51	11,200	1,70	12,30	4
		3	8,61	6,29	0,94	6,91	2
		4	9,74	11,200	1,70	12,30	1
		5	5,73	11,200	1,70	12,30	1
		6	6,48	11,200	1,70	12,30	1
		7	31,11	11,200	1,70	12,30	4
	Câmara Analógica	1	24,88	14	2,1	11,9	3
		2	31,51	14	2,1	11,9	4
		3	8,61	6,29	0,94	5,53	2
		4	9,74	14	2,1	11,9	1
		5	5,73	14	2,1	11,9	1
		6	6,48	14	2,1	11,9	1
		7	31,11	14	2,1	11,9	4

Numa primeira análise do plano fotográfico, verifica-se que apenas em relação à fachada 3 não é possível manter a distância ao objecto devido à existência de um edifício a uma distância próxima da fachada. Assim, neste caso particular, será necessário efectuar um planeamento ligeiramente diferente, também presente na Tabela 5.6, e que implica que a escala fotográfica seja alterada – passa a ser 1:225, implicando um factor de ampliação 2,5 ainda considerado aceitável. Relativamente às fachadas designadas por 2a e 7a, como estão ligeiramente recuadas, a distância ao objecto aumenta ligeiramente, diminuindo a escala e aumentando a base proporcionalmente para que a relação base/distância ao objecto se mantenha constante. A escala nestes casos concretos passa a ser 1:435.

As fachadas designadas por 2 e 7 têm uma parte superior mais recuada – cerca de 3,00 m. Este facto implica que a escala da fotografia, mantendo o alinhamento das estações, passa a ser 1:500, ainda dentro do limite máximo de ampliação. No que diz respeito à sobreposição das fotografias esta é, de um modo geral, de aproximadamente 87,8%.

A numeração das fachadas na Tabela 5.6 está coerente com a numeração atribuída no plano fotográfico da Figura 5.9.

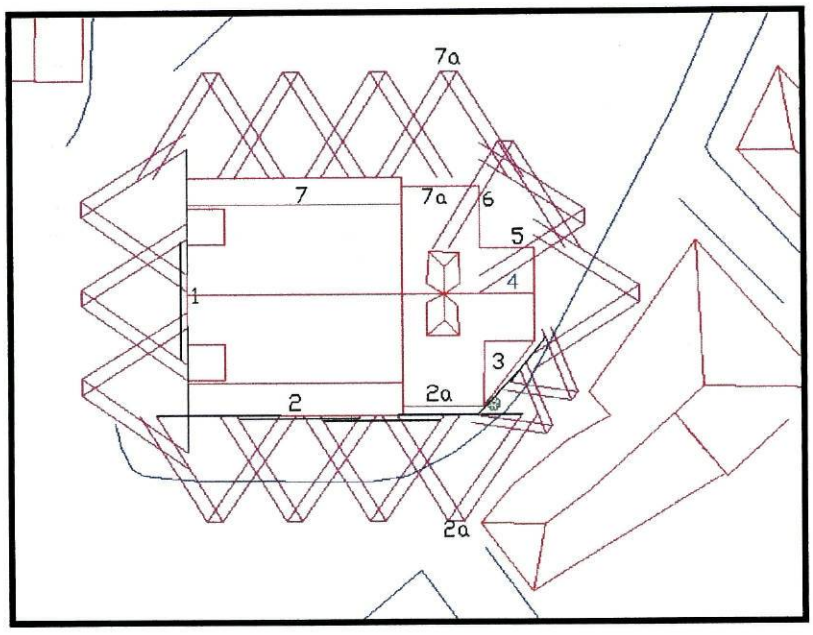


Figura 5.9 – Plano fotográfico para a cobertura da Igreja Matriz de Oeiras.

Após reconhecimento do terreno para validação do plano de cobertura fotográfica, verificou-se que, apesar da fotografia aérea ser bastante anterior à data da realização do trabalho e serem nítidas as alterações que ocorreram na envolvente da Igreja, não houve alterações no respeitante à largura de ruas e aos edifícios existentes. Deste modo, o plano de cobertura fotográfica pôde ser cumprido, com algumas alterações, devido a árvores existentes à frente das fachadas, especialmente da fachada designada por 2, que por vezes obstruíam pontos de pormenor importantes.

Na Figura 5.10 pode ver-se um exemplo de um par estereoscópico de um pormenor da fachada Sul da Igreja de Oeiras obtido com a câmara métrica digital. A Figura 5.11 mostra um exemplo de um par estereoscópico, da fachada principal de Ponta Delgada, obtido com a câmara semi-métrica analógica.

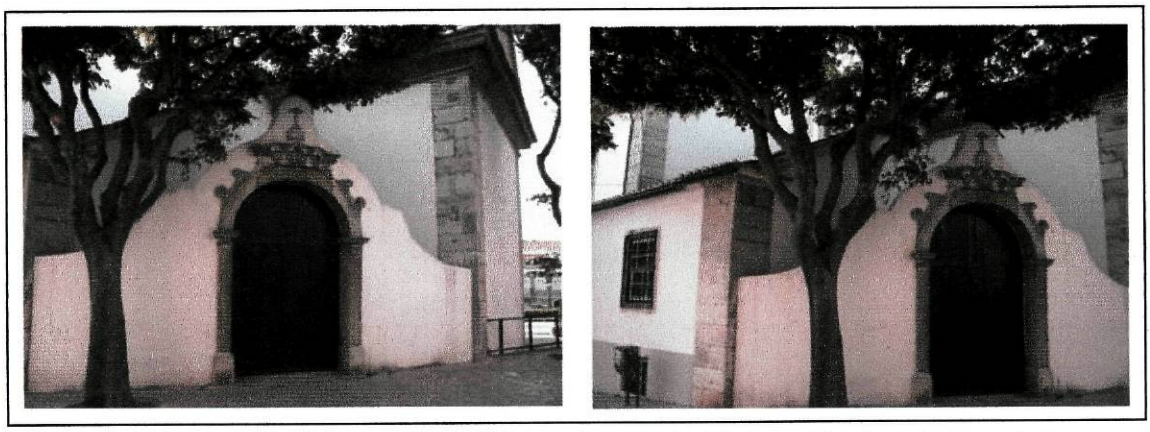


Figura 5.10 – Exemplo de um par estereoscópico, da fachada Sul da Igreja Matriz de Oeiras, obtido com a câmara métrica digital.

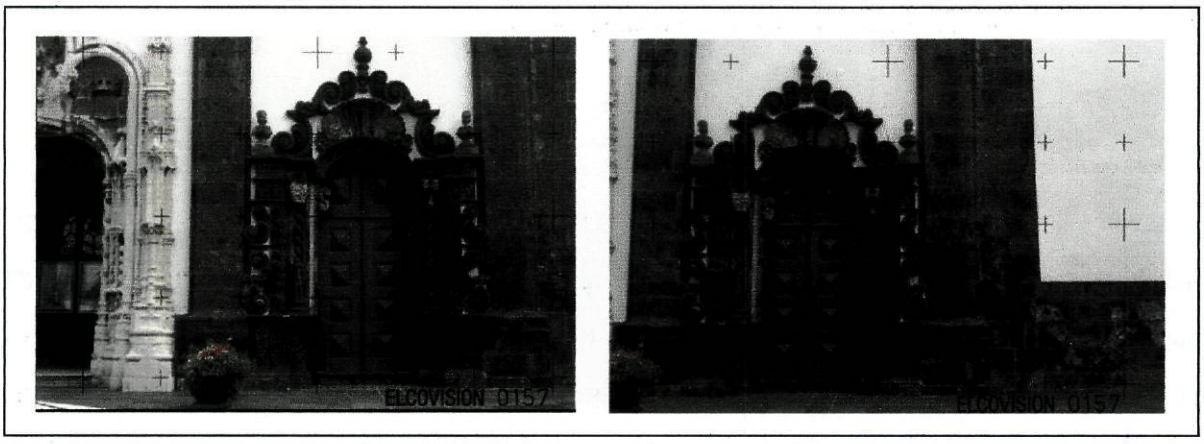


Figura 5.11 – Exemplo de um par estereoscópico, de uma parte da fachada principal da Igreja Matriz de Ponta Delgada, obtido com a câmara semi-métrica.

O planeamento fotográfico referente à aquisição de fotografias da Igreja Matriz de Ponta Delgada foi executado partindo dos mesmos pressupostos utilizados para a Igreja de Oeiras. A Figura 5.12 mostra o plano fotográfico, executado em gabinete, para a Igreja Matriz de Ponta Delgada.

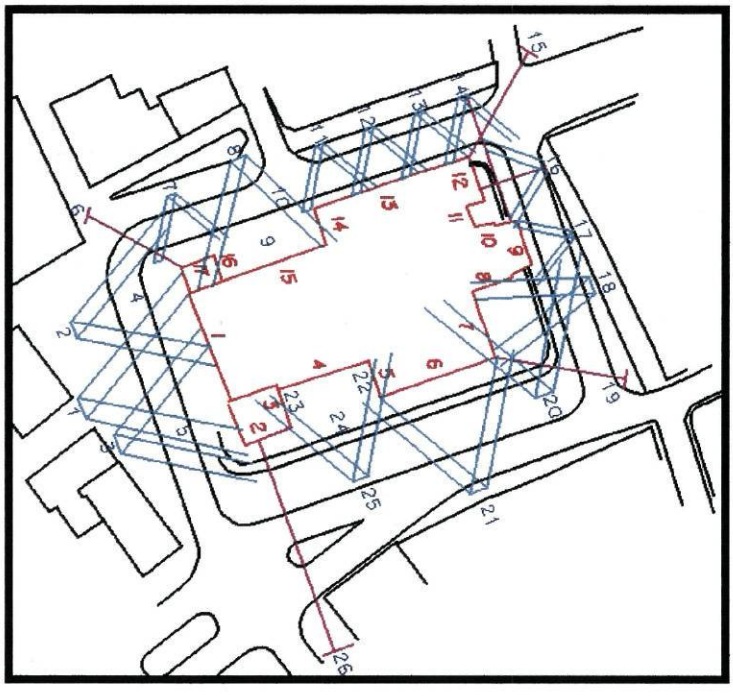


Figura 5.12 – Plano fotográfico para a cobertura da Igreja de Ponta Delgada.

5.4.2.2 FOTOGRAMETRIA CONVERGENTE MONOSCÓPICA

O planeamento da aquisição das imagens para a extracção de informação por técnicas de fotogrametria monoscópica convergente é feito tendo em consideração uma série de cuidados relativamente ao posicionamento da câmara, para garantir que se cumpram as condições descritas no Capítulo 2, referentes à geometria convergente. Como é perceptível, após a leitura desse mesmo capítulo, o planeamento para a aquisição de fotografias para o método convergente não está devidamente estabelecido, existindo apenas algumas regras empíricas importantes para que a precisão do produto final seja a requerida. Assim, tendo em atenção que os ângulos entre os raios das fotografias devem ser próximos de 90°, pode efectuar-se um plano de cobertura fotográfica na tentativa de obter as estações fotográficas ideais, para que em campo seja mais fácil a sua implementação. O plano fotográfico prevê assim, para cada fachada ou parte da fachada, a aquisição de, pelo menos, três fotografias, uma numa posição central, outra numa posição lateral direita e outra numa posição lateral esquerda (Figura 5.13), com sobreposição suficiente (que pode chegar aos 100%) para conter pormenor igual nas várias posições fotográficas.

As fotografias ao longo das várias fachadas da igreja foram obtidas tendo, sempre que possível, em consideração as posições fotográficas do plano de aquisição, evitando o problema provocado pelas diversas árvores existentes à frente das fachadas (destaque especial para a fachada designada por 2), que escondem determinados pormenores importantes e que seriam comuns a outras fotografias, essenciais à convergência de raios para esses pontos e também para a ligação entre as mesmas. O plano estabelecido para essa fachada não pôde ser cumprido para que se evitassem, o máximo possível, as árvores.

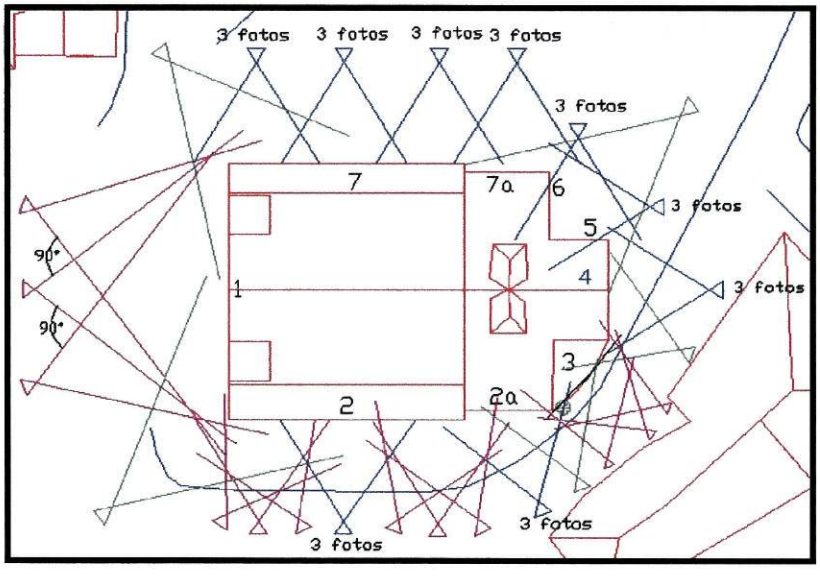


Figura 5.13 – Plano fotográfico (geometria convergente) para a cobertura da Igreja de Oeiras.

Após verificação das imagens chegou-se a algumas conclusões relativas à visibilidade dos pormenores, que obrigaram a um regresso ao campo, fazendo assim com que o processo tenha sido iterativo, até obter uma configuração de estações fotográficas e número de fotografias por estação suficientemente robusta para obter os resultados pretendidos.

Com a câmara digital métrica as imagens obtidas são de grande resolução permitindo a fácil identificação dos pormenores importantes e necessários. Esta facilidade degrada-se ligeiramente com a câmara digital não métrica, dado o tamanho do pixel ser ligeiramente superior.

No caso das câmaras analógicas, apesar da qualidade do filme, a resolução é inferior a qualquer outra das digitais, dificultando a identificação fácil de pormenores. Este facto deve-se ao processo de rasterização que faz com que a resolução original seja perdida, uma vez que não foi usado um *scanner* fotogramétrico.

A perda de definição dos pormenores importantes da imagem não é, normalmente, visível nas fotografias obtidas com a câmara colocada na posição central, mas sim num dos lados (oposto à posição em que é adquirida) das fotografias obtidas nas posições laterais.

Na Figura 5.14, 5.15 e 5.16 podem ver-se algumas das fotografias adquiridas com a câmara digital métrica, com a câmara digital não métrica e com a câmara semi-métrica, respectivamente. Com a câmara digital não-métrica e analógica semi-métrica, foi preciso tirar um conjunto de fotografias cuja resolução fosse suficiente para poder depois proceder à continuação do trabalho.



a) b) c)

Figura 5.14 – Fotografias da fachada principal da Igreja de Oeiras obtidas com a câmara digital métrica: a) com orientação da direita, b) com posição central à fachada e c) com orientação da esquerda.

A Igreja de Oeiras foi, deste modo, toda coberta fotograficamente, com fotografias tiradas à volta da mesma, sempre com o cuidado de obter pelo menos três fotografias de cada área fotografada. Em fotografias consecutivas tem de se ter presente que devem conter pormenores das anteriores, para que seja possível a ligação entre elas. Na transição das fachadas é importante tirar uma fotografia, numa posição tal, que contenha parte da fachada anterior e parte da imediatamente a seguir (Figura 5.17).

Todo este processo tem como premissa essencial a não alteração da distância focal no caso das câmaras não-métricas, ou seja, a não utilização do sistema de *zoom* por parte do operador.



Figura 5.15 – Fotografias da fachada principal adquiridas com a câmara digital não métrica.



Figura 5.16 – Algumas das fotografias da fachada principal adquiridas com a câmara analógica semi-métrica.

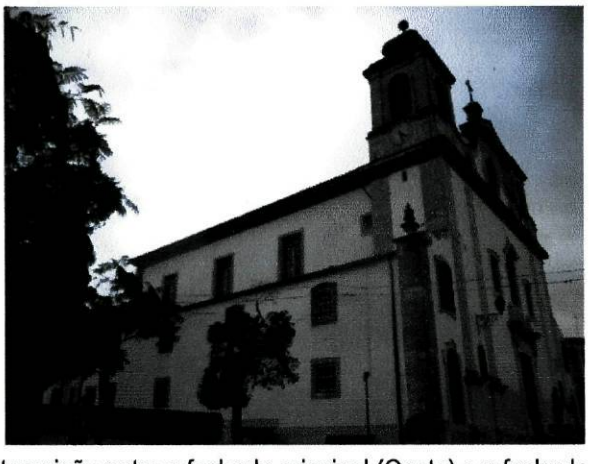


Figura 5.17 – Fotografia de transição entre a fachada principal (Oeste) e a fachada Norte, obtida com a câmara métrica digital.

5.4.3 PLANEAMENTO E AQUISIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLO

A fase do levantamento dos pontos de controlo é uma fase importante em todo o processo sendo por isso necessário executá-la de forma muito cuidadosa, uma vez que a precisão final é inferior à sua e é a partir deles que se orienta e escala as fotografias. Neste trabalho, os pontos de controlo são naturais, isto é, não foram colocados alvos reflectores específicos ao longo da Igreja. Os pontos de controlo escolhidos são então pontos notáveis existentes nas fachadas, como sejam cantos das janelas, vértices de pormenores à volta de portas e janelas, final das arestas das próprias fachadas ou vértices do telhado. Notou-se que os vértices dos "pilares" e dos extremos de linhas da fachada não são pontos aconselháveis, uma vez que na imagem podem ser difíceis de medir devido ao fraco contraste com o pano de fundo. Na Figura 5.18 podem ver-se alguns exemplos de pontos de controlo naturais e na Figura 5.19 um exemplo de pontos da fachada que não devem ser escolhidos.

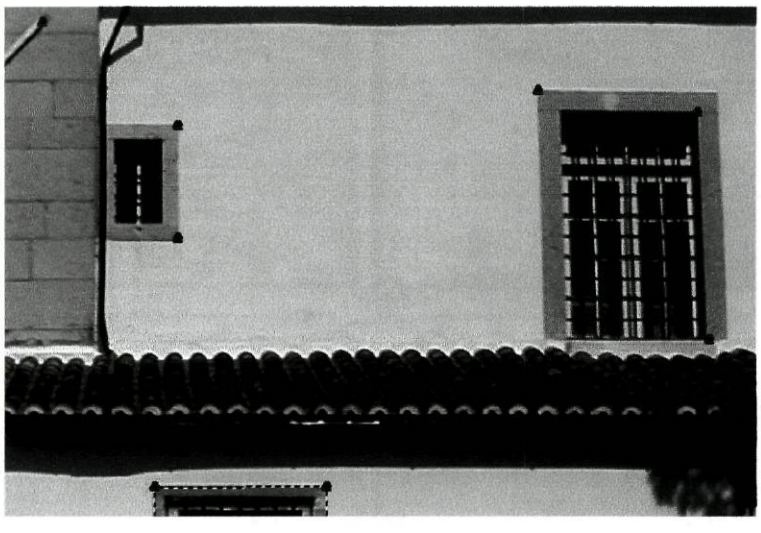


Figura 5.18 – Exemplos de pontos de controlo naturais.

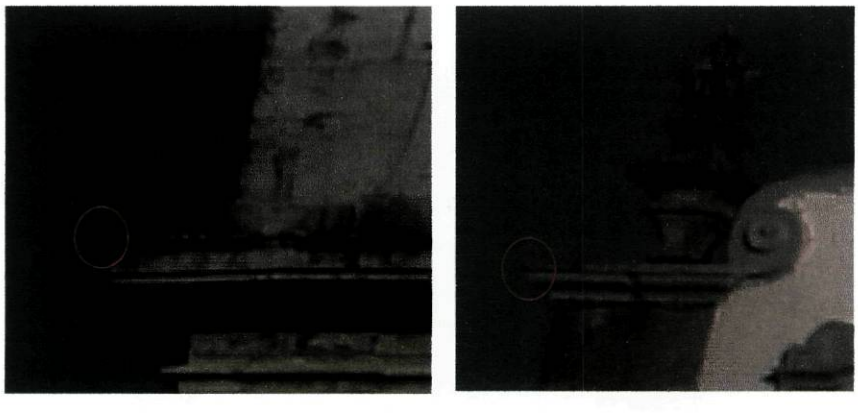


Figura 5.19 – Exemplos de pontos de controlo naturais que não devem ser escolhidos, uma vez que na imagem é de difícil identificação o local exacto que foi medido em campo, devido ao fraco contraste.

Foram levantados, por fachada, um número maior do que o necessário de pontos de controlo, tendo em consideração os seguintes factos: pontos que são perfeitamente visíveis na imagem obtida de uma posição central podem não o ser quando a fachada é observada da direita ou da esquerda; pontos que parecem muito nítidos (parecendo pontos ideais para controlo) quando observados directamente ou pela objectiva da estação total, na imagem podem não ser passíveis de ser utilizados. Como é um trabalho que exige a presença em campo, é preferível levantar pontos em excesso, para que possa ser possível a eliminação dos menos adequados, sem prejuízo do número necessário e suficiente para o cálculo da solução.

Para a obtenção das coordenadas tridimensionais destes pontos efectuou-se um levantamento topográfico: começou por se observar uma poligonal fechada sobre si mesma, à volta dos monumentos por forma a obter um esqueleto de apoio sólido e preciso para o levantamento de pormenor, depois de devidamente calculado e compensado. A poligonal fechada foi calculada e compensada no *software* de cálculo topográfico *Autodesk Land Development*, sendo a compensação efectuada pelo método dos mínimos quadrados.

Para o levantamento dos pontos de controlo é habitual usar o chamado método de intersecção directa (Xerez, 1969), uma vez que este método permite o cálculo de coordenadas de pontos inacessíveis (onde não é possível colocar o prisma), a partir de observações angulares, horizontais e verticais, feitas a partir de dois pontos de coordenadas conhecidas (chamada base), que poderão ser dois dos vértices da poligonal. Os pontos de controlo a levantar têm de ser visíveis desses dois vértices. Hoje em dia existem estações totais (2.3.3.2) com distanciómetro laser, que possibilitam o levantamento de pontos inacessíveis de um modo "directo", ou seja, obtém-se a distância por reflexão do sinal laser pela superfície onde incide, sem ser necessário recorrer ao método de intersecção directa. Foi este o tipo de instrumento utilizado ao longo deste trabalho.

Cada ponto de controlo foi numerado e marcado nas respectivas fotografias, tendo sido desenhado um croqui para os pontos que poderiam suscitar dúvidas na sua identificação. A Figura 5.20 mostra um exemplo de croqui (feito manualmente em campo e rasterizado à posteriori) para alguns pontos de controlo.

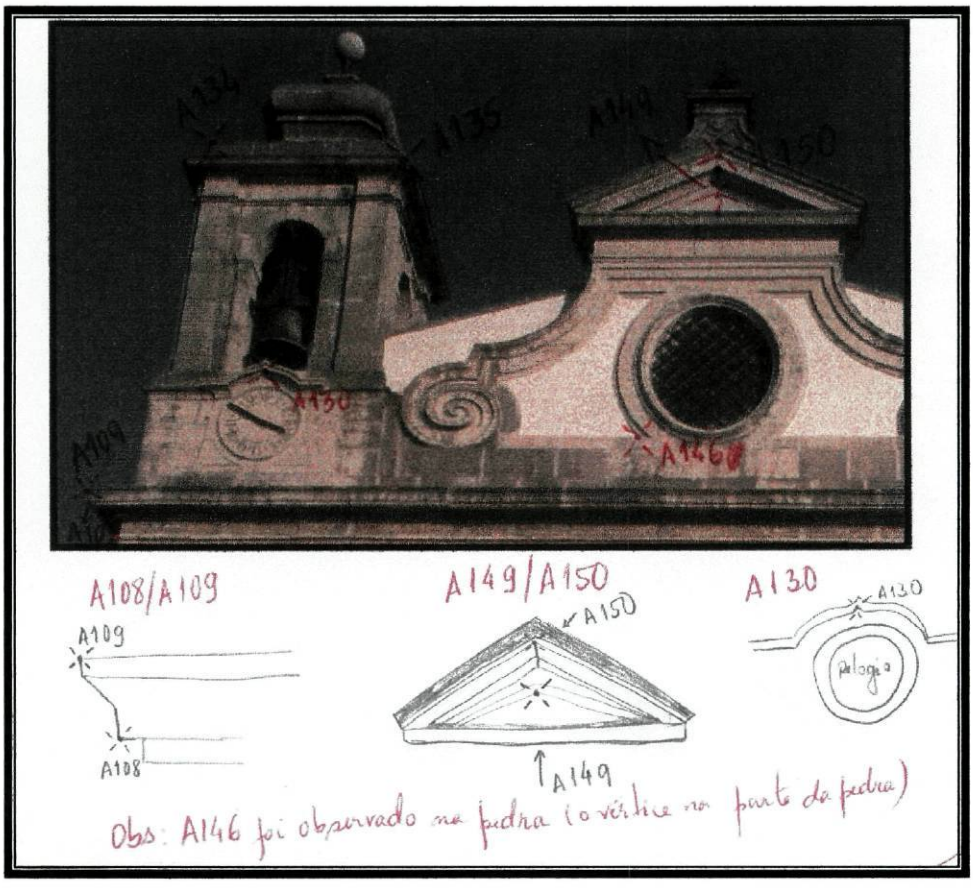


Figura 5.20 – Exemplos de marcação de pontos de controlo na fotografia e croqui dos pontos que possam suscitar dúvidas na sua identificação.

5.5 ARQUIVO ARQUITECTÓNICO

Após a aquisição de dados efectuou-se o processamento dos mesmos com vista à extracção de informação tridimensional das imagens pelos métodos fotogramétricos em estudo. O processamento de dados é efectuado de forma distinta em cada um deles, uma vez que os princípios inerentes a cada um diferem substancialmente, como se pode constatar pela leitura do Capítulo 2. Além das diferenças fundamentais relacionadas com os métodos de aquisição de fotografia e dos algoritmos utilizados na solução, a forma como são visualizados os dados durante o processo de medição é também distinta: no SSK esta é baseada na estereoscopia, enquanto no *PhotoModeler* apenas é possível a medição e observação monoscópica.

Descrevem-se resumidamente as etapas mais importantes para o processamento dos dados em cada um dos *softwares* e apresentam-se, no final de cada descrição, os resultados obtidos por cada um dos métodos.

5.5.1 *IMAGESTATION* SSK

O diagrama representativo do processo de restituição fotogramétrica terrestre pelo método estereoscópico pode visualizar-se na Figura 5.21 e inclui os processos de orientação, quer por ajustamento conjunto do bloco na opção multifoto (triangulação), quer modelo a modelo, seguindo-se depois a reamostragem das imagens para o formato epipolar e posteriormente a restituição tridimensional dos modelos. Em cada uma destas fases existe um certo número de requisitos que têm de ser cumpridos e que são descritos, resumidamente, ao longo do texto.

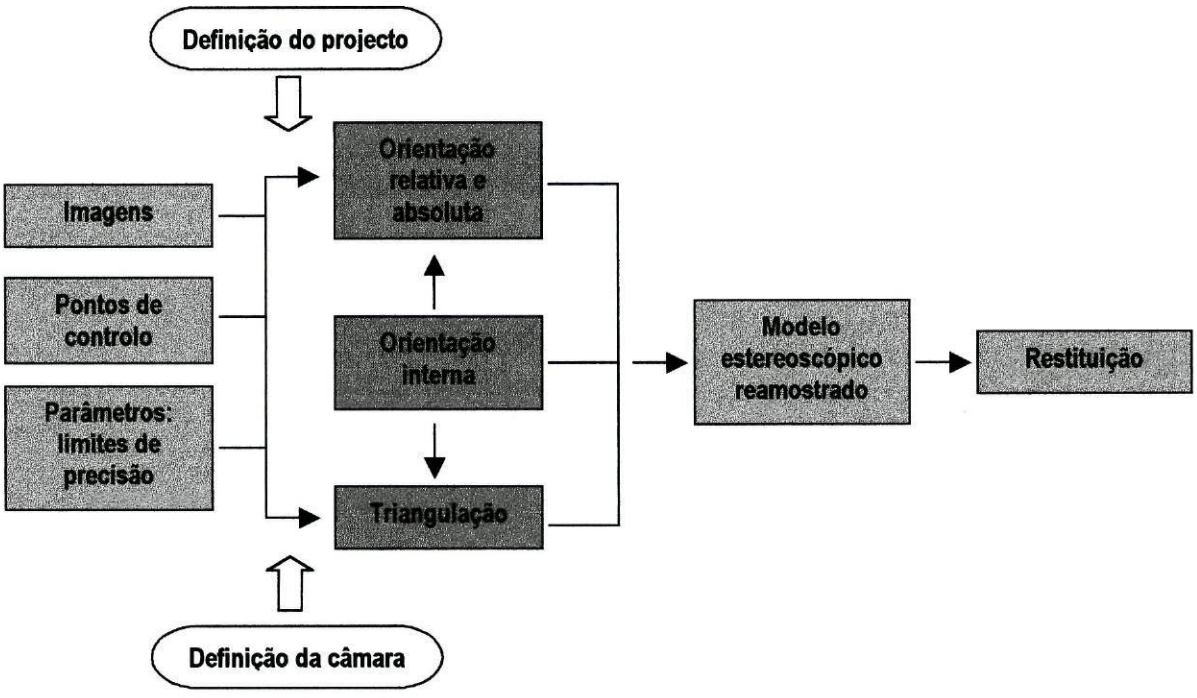


Figura 5.21 – Diagrama geral representativo das etapas a efectuar no SSK para obter coordenadas tridimensionais dos pontos de pormenor e a restituição do detalhe.

Segue-se então a descrição resumida dos procedimentos a efectuar em cada uma destas etapas, sendo também referido quais os dados de entrada e de saída em cada uma delas, bem como os parâmetros inerentes às mesmas que são, normalmente, variáveis e definidos pelo utilizador.

a. Definição do projecto e da câmara

Na definição do projecto é introduzida informação que inclui as unidades angulares e lineares, o tipo de projecto, sistema de coordenadas e o número de pontos de *Von Gruber* (Apêndice A) usados. São definidos uma série de parâmetros referentes aos limites de precisão aceitáveis para os vários processos de orientação. A Tabela 5.7 resume os valores seleccionados na criação dos vários projectos efectuados.

Tabela 5.7 – Resumo das variáveis e parâmetros envolvidos na definição do projecto.

DADOS DE ENTRADA	PARÂMETROS
• Tipo de Projecto: terrestre • Sistema de coordenadas: por defeito • Unidades lineares: metros • Unidades angulares: graus • Pontos de *Von Gruber*: 3	• **Limites aceitáveis para a orientação interna**: Sigma Max: 10 μm RMS Max: 10 μm • **Limites aceitáveis para a orientação relativa:** Sigma Max: 10 μm Paralaxe em Y Máx: 10 μm • **Limites aceitáveis para a orientação absoluta/ajustamento por feixes:** Sigma Máx: 10 μm

No que respeita à definição das câmaras utilizadas, os dados são necessários para a realização da orientação interna e devem ser disponibilizados pela calibração. Na Tabela 5.8 apresentam-se os valores utilizados para a câmara analógica e para a câmara digital métricas.

Tabela 5.8 – Resumo dos elementos envolvidos na definição das câmaras analógica e digital métricas.

DADOS DE ENTRADA	CÂMARA ANALÓGICA			CÂMARA DIGITAL
Distância focal	35 mm			7,56 mm
Ponto Principal	(X,Y) = (0,1370, 0,1190)			(X,Y) = (-0,0985, -0,3631)
Pontos reseau	ID	X (mm)	Y (mm)	Não tem
	11	3	2	
	14	18	2	
	17	33	2	
	31	3	12	
	33	18	12	
	37	33	12	
	51	3	22	
	54	18	22	
	57	33	22	
Distorção das lentes	Ver curvas na secção 5.4.1			Ver curvas na secção 5.4.1

b. Orientação das fotografias

O processo de orientação das fotografias é fundamental para que seja possível obter informação métrica fidedigna a partir das mesmas. O fluxograma deste processo inicia-se com a orientação interna das imagens, seguindo-se a orientação multifoto pela ligação entre as fotografias ao longo das fiadas e

ajustamento às coordenadas do sistema de referência terrestre das várias fotografias que compõem o projecto.

Para realizar a orientação interna o utilizador efectua a medição das marcas fiduciais das imagens, que no caso da câmara analógica semi-métrica Leica R5 são as marcas da *réseau*. Depois de efectuadas as medições, o *software* efectua o cálculo dos parâmetros de orientação interna por intermédio de uma transformação matemática (conforme ou afim), usando para isso as coordenadas das marcas fiduciais fornecidas pela calibração e as correspondentes coordenadas medidas.

Para o *software* realizar a orientação das imagens, procede-se à medição dos pontos de ligação e posteriormente à medição dos pontos de controlo, em cada fotografia, processo que o SSK designa por multifoto. Para a medição dos pontos de ligação, o *software* dá indicação sobre a localização dos mesmos nas posições de *Von Gruber*, procedendo-se à leitura de pontos comuns bem identificáveis nas várias fotografias a que pertencem. Após as primeiras medições, o *software* auxilia o processo, efectuando a movimentação da imagem para o ponto seguinte. Existe ainda a possibilidade da medição automática dos pontos de ligação, por técnicas de correlação. Também neste caso as medições podem ser remedidas, apagadas ou suspendidas da solução. No que diz respeito à medição dos pontos de controlo o processo de medição é similar ao anterior, tendo desta vez que identificar e medir os pontos de controlo previamente importados para o projecto. Os resultados destes processos são apresentados na forma de resíduos imagem, valor da paralaxe em y, resíduos dos pontos de controlo, entre outros dados estatísticos que permitem a análise dos resultados das orientações.

c. Reamostragem do modelo estereoscópico

Depois de calculados os parâmetros de orientação para cada par estereoscópico, este é reamostrado para o formato epipolar (Slama, 1980). Este processo, envolve a reamostragem dos pixels de cada imagem do modelo estereoscópico de forma a eliminar a paralaxe em y (ou seja, ao longo das linhas epipolares). Para além disso a reamostragem epipolar também elimina efeitos como inclinação do sensor e entra em linha de conta com correcções que o utilizador tenha introduzido, como por exemplo, a distorção das lentes. Este processo é compulsório para projectos de fotogrametria terrestre permitindo que os modelos possam ser utilizados no módulo seguinte para a extracção de informação.

d. Restituição estereoscópica

Depois da reamostragem das imagens para a geometria epipolar, cada modelo pode ser visualizado e restituído estereoscopicamente. A restituição é efectuada no módulo ISSD (5.3.2), tirando partido de todas as suas funcionalidades, nomeadamente no que respeita à manipulação dos modelos e às ferramentas da plataforma *Microstation*. Com o objectivo de produzir alçados das fachadas, como

elemento importante no arquivo arquitectónico, são restituídos todos os pormenores e linhas mestras relevantes das mesmas.

Este módulo foi também utilizado para medição das coordenadas de pontos de verificação utilizados no cálculo das diferenças entre o medido pela topografia e o restituído, para posteriores comparações. Os testes foram efectuados em relação à Igreja de Oeiras, utilizando as câmaras métricas: digital (Rollei) e analógica (Leica R5), para verificar a precisão possível de alcançar com ambas as câmaras usando o método estereoscópico (5.8).

Foram detectados os seguintes problemas durante o processamento das imagens no SSK:

- O *software ImageStation* SSK, na definição da câmara métrica digital, não aceita o valor da distância focal, dado que esta tem um valor inferior a 10 mm, que é o mínimo permitido. Para ultrapassar esta restrição define-se a câmara com um valor falso de distância focal, superior a 10 mm. Depois de definida editam-se os ficheiros de texto da câmara e coloca-se a distância focal correcta. Este facto parece não ter relevância enquanto se efectua todo o processo de orientação, uma vez que os resíduos resultantes estão dentro dos limites requeridos (Tabela 2.2).

- Apesar das orientações indicarem que o par estereoscópico se encontra em condições de extrair informação tridimensional correcta a partir destes, verifica-se que a leitura interactiva de coordenadas no par estereoscópico revela diferenças relevantes, para a coordenada Z, quando comparada com as coordenadas topográficas. Este facto é quantificado e analisado na secção 5.8.1.

  Deve-se ainda salientar que no processo de reamostragem a que se tem que recorrer após a orientação do par e antes de o utilizar no módulo de extracção de informação tridimensional ISSD, não é permitida a selecção da área útil do modelo. A escolha automática, pelo *software*, implica uma redução significativa em relação à área de sobreposição utilizada na orientação.

Apesar das dificuldades referidas chegou-se à conclusão de que o centro do par estereoscópico tem precisão suficiente para ser utilizado no processo de restituição para fins de visualização, e foram essas áreas de dimensões relativamente reduzidas dos diversos pares estereoscópios que constituem as fachadas, que foram utilizadas na restituição. No entanto, esta solução não é satisfatória e esta avaliação demonstrou a necessidade de, através de contactos com os fabricantes do *software*, tentar ultrapassar o problema, para que o sistema se possa vir a considerar verdadeiramente operacional.

Assim, o processo de restituição fotogramétrica, para criar os alçados das fachadas, foi efectuado utilizando somente os dados referentes à Igreja Matriz de Ponta Delgada. Na Figura 5.22 pode visualizar-se o resultado, sem edição, da restituição da fachada principal. Para além de ser um processo bastante moroso, surgem também as dificuldades ao nível de decisão de critérios de restituição que, como é óbvio, é intrinsecamente diferente da restituição fotogramétrica aérea com que o operador estava familiarizado.

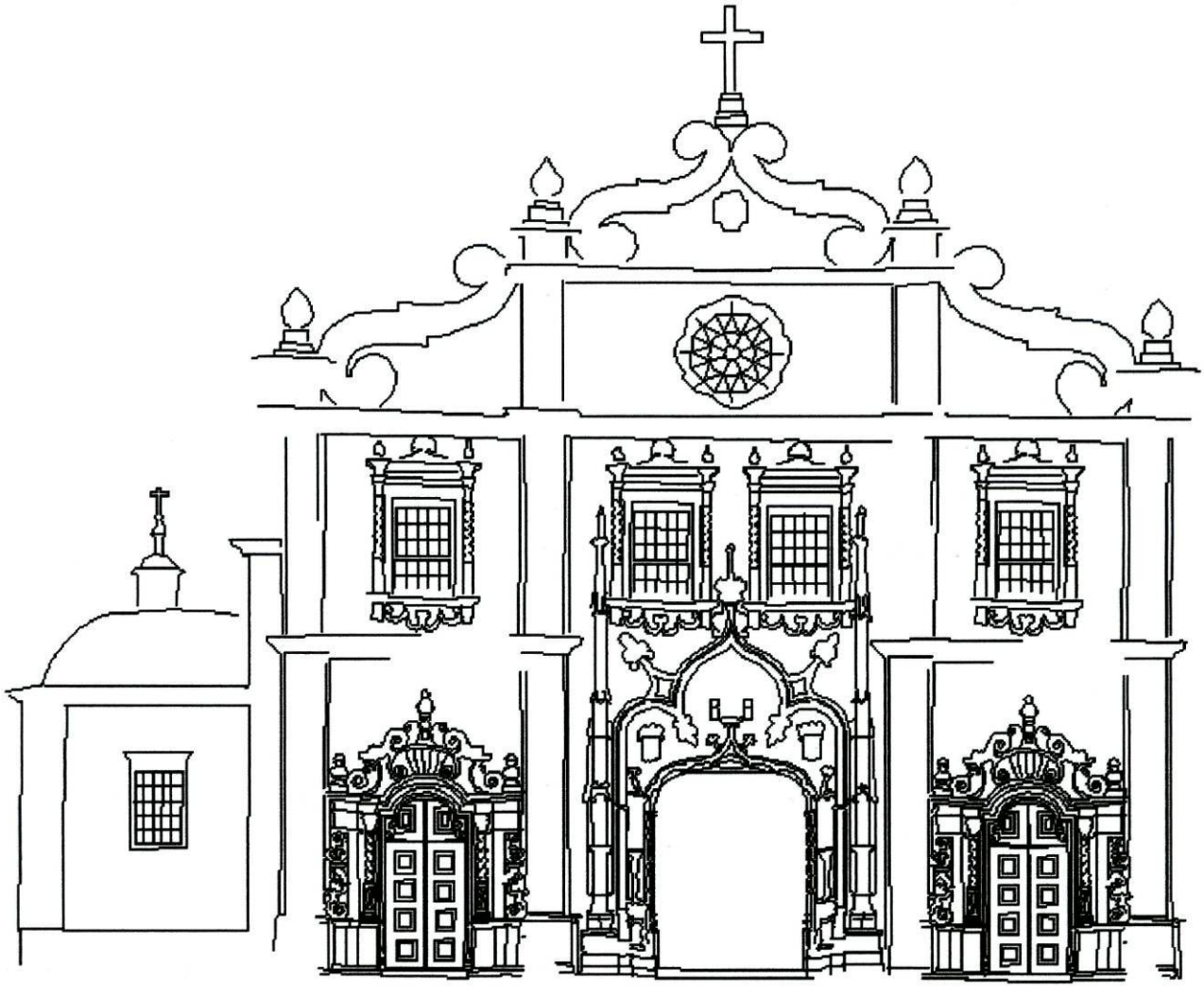


Figura 5.22 – Alçado principal da Igreja de Ponta Delgada à escala aproximada de 1:200.

5.5.2 *PHOTOMODELER* 4.0

Para a criação de um modelo 3D ou para a restituição das fachadas são várias as etapas que é necessário percorrer no *PhotoModeler*. Estas etapas encontram-se resumidas, de um modo geral, na Figura 5.23. Cada uma delas será descrita mais pormenorizadamente ao longo deste texto.

A filosofia de funcionamento do *PhotoModeler* pressupõe um primeiro processamento com apenas algumas fotografias e alguns pontos de controlo para verificar se os ângulos de aquisição das fotografias estão suficientemente próximos do 90° e para evitar a ocorrência de erros grosseiros na orientação das fotografias.

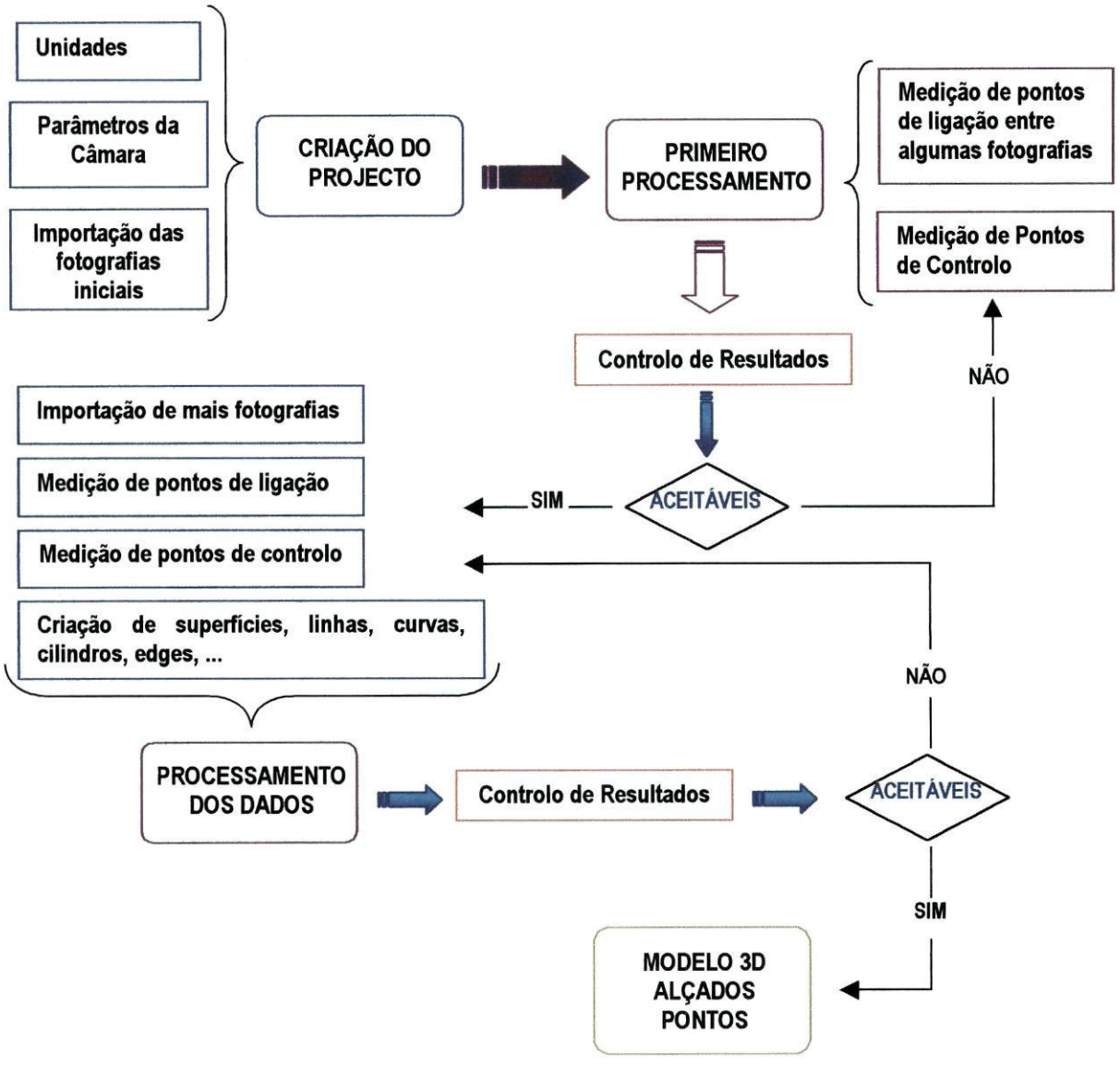


Figura 5.23 – Esquema geral das etapas a efectuar no *PhotoModeler* para a extracção de informação.

Depois de avaliado este primeiro processamento efectuam-se mais medições e melhoramentos que levam a um novo processamento, sendo este uma iteração do primeiro. O controlo de resultados é novamente efectuado, e se todos os parâmetros apontarem para um resultado favorável na criação do

modelo 3D, pode continuar-se o processo. A sua continuação implica, normalmente, a importação de mais fotografias bem como a medição de mais pontos de ligação e de controlo.

Convém salientar que o processo é basicamente o mesmo no que diz respeito à criação do modelo 3D e à restituição da fachada, embora neste último caso tenha de haver um especial cuidado com a criação de superfícies, que será abordado mais tarde.

a. Criação do projecto e primeiro processamento

Para a criação do projecto no *PhotoModeler* existe uma "caixa de diálogo" que conduz o operador nas várias tarefas a realizar: escolha das unidades, escolha da câmara associada ao projecto e respectivos parâmetros de calibração. É nesta fase que se importam as primeiras fotografias, em número não superior a quatro, para que seja mais fácil seguir com as restantes etapas evitando possíveis erros e confusões. É importante ter em atenção que também nesta fase se pode associar uma câmara diferente a cada fotografia, caso haja fotografias tiradas com câmaras diferentes. Neste trabalho, a cada projecto está apenas associada uma câmara, não tendo existido mistura de fotografias das duas câmaras, uma vez que se pretende avaliar o desempenho do *software* com câmaras diferentes em situações similares.

Depois de criado e parametrizado o projecto, é então necessário proceder à orientação das fotografias para posterior obtenção de coordenadas tridimensionais dos pontos de interesse da respectiva fachada. O processo inicia-se com a orientação interna efectuada através dos parâmetros obtidos directamente pelo *software* de calibração (5.4.1) e pela medição das marcas fiduciais no caso das câmaras analógicas.

Seguidamente, procede-se à medição de pontos comuns nas várias imagens para efectuar a sua ligação. Devem ser medidos nesta fase inicial cerca de 10 a 15 pontos comuns. É necessário que o mesmo ponto esteja em pelo menos 3 fotografias e que estas tenham uma separação angular apropriada, para que os raios de convergência nesse ponto formem um ângulo o mais possível próximo dos 90 graus. Esta premissa é essencial para que as coordenadas tridimensionais dos pontos sejam calculadas com grande precisão.

Aos pontos que são inicialmente marcados numa imagem (chamada de referência) é-lhes atribuído um número único de identificação, sendo considerados distintos. Quando se efectua o processo de ligação das várias imagens, os pontos medidos nas restantes imagens são referenciados aos respectivos pontos da imagem de referência, sendo-lhe atribuído o mesmo número de identificação. A Figura 5.24 mostra o processo de referenciação onde se podem ver pontos medidos sem estarem referenciados e

pontos já referenciados. Pode ver-se a diferente numeração que o *software* atribui a cada ponto, sendo que os comuns nas duas fotografias têm a mesma identificação.

Após este processo, medem-se também alguns pontos de controle nas várias imagens, procedendo assim à orientação absoluta das fotografias, para as escalar.



Figura 5.24 – Exemplo de referenciação de pontos: a amarelo estão os que já foram referenciados. A imagem 1 serve de referência para as outras imagens.

Efectuados todos os requisitos para a orientação das imagens, o próprio *software* avalia a expectativa do resultado deste primeiro processamento, providenciando dados estatísticos relativos aos pontos identificados. O potencial sucesso do processamento é analisado tendo em atenção o número de pontos marcados em cada imagem assim como o número de imagens em que foram medidos. Se a expectativa for aceitável procede-se ao processamento dos dados. Apenas depois deste primeiro processamento é possível obter informações mais detalhadas e completas sobre a precisão do ajustamento por feixes. Esta é a razão pela qual se apelida esta fase de primeiro processamento.

O objectivo principal do processamento é obter fotografias devidamente orientadas de forma a ser possível a reconstrução correcta do modelo tridimensional ou da restituição das fachadas.

b. Controlo do resultado do processamento

Depois do primeiro processamento efectua-se um controlo dos resultados recorrendo à caixa de diálogo *Audit* (Figura 5.25), subdividida em quatro separadores, a partir dos quais é possível verificar se estão a ser cumpridos todos os critérios necessários para a obtenção de coordenadas

tridimensionais precisas, nomeadamente no que respeita ao número de pontos e imagens, à intersecção angular e ao número de raios de feixe por ponto.

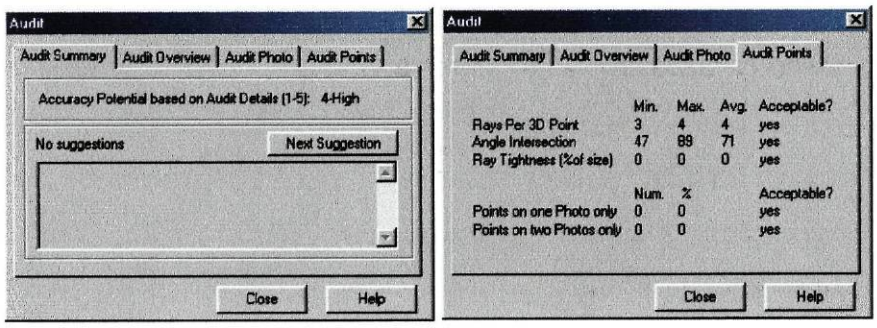


Figura 5.25 – Caixa de diálogo com a informação sobre a qualidade do primeiro processamento.

Outro meio de se avaliar o modelo obtido com este primeiro processamento é através da análise visual usando o visualizador tridimensional (*3D Viewer*) e cujo exemplo, obtido no processamento inicial da fachada principal, pode ser visto na Figura 5.26. São também visíveis as posições da câmara aquando da aquisição de cada uma das imagens, o que permite fazer uma avaliação, embora superficial, do resultado obtido. No *3D Viewer* podem efectuar-se rotações, *zooms* e movimentos em várias direcções que permitem a visualização tridimensional do modelo que se está a construir, facilitando o acompanhamento da evolução do mesmo.

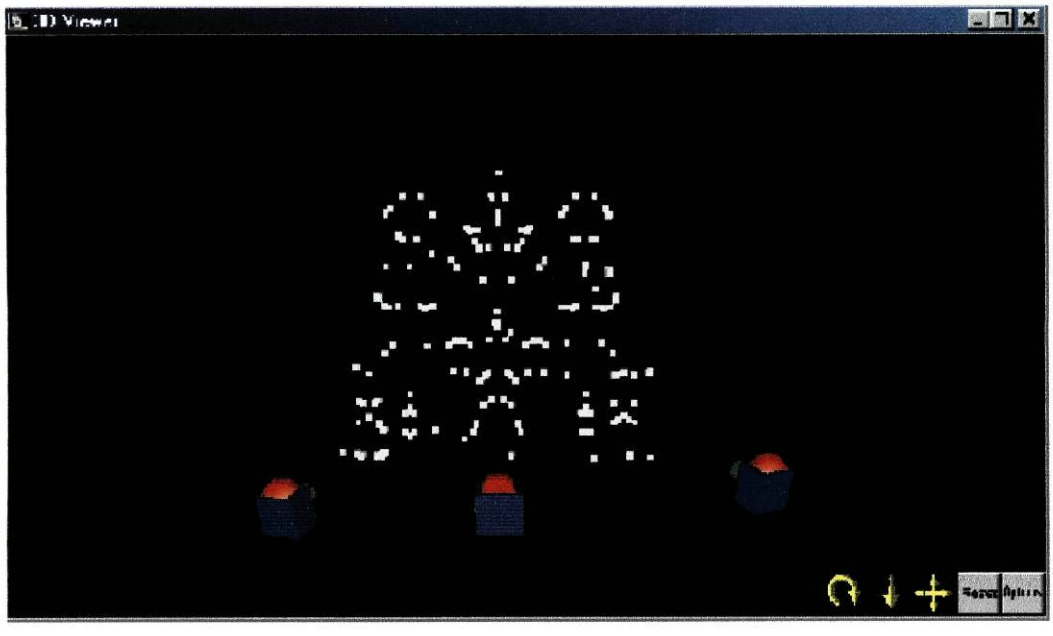


Figura 5.26 – *3D Viewer*: visualizador tridimensional.

O *software* fornece ainda uma tabela com informação adicional sobre as imagens, nomeadamente no que diz respeito ao valor máximo de resíduo encontrado em cada uma delas, bem como o respectivo erro médio quadrático e o número de pontos de ligação e de controlo medidos em cada uma. Fornece

também uma tabela com os resíduos obtidos nas direcções X, Y e Z depois do ajustamento por feixes (Figura 5.27), que dizem respeito à diferença entre as medições efectuadas pelo operador e as calculadas pelo algoritmo.

A informação presente na tabela da Figura 5.27 indica ao operador se pode continuar com a criação do modelo tridimensional ou se tem de rever o que foi feito até então. A presença de muitos pontos com ângulos de intersecção bastante agudos (inferiores a 40 graus) significa que as fotografias não foram obtidas com a separação angular ideal ou aceitável, pelo que não vale a pena prosseguir, pois os resultados não serão satisfatórios. Se os resíduos obtidos para cada um dos pontos neste primeiro processamento forem muito elevados (superiores a 5 cm) aconselha-se a rever todas as medições até então efectuadas.

Point Table

pontos | Configure... | Close | Properties... | Export... | Help

Id	X (m)	Y (m)	Z (m)	X Precision	Y Precision	Z Precision	Use In Processing	Photos	Angle (deg.)	Tightness (%)
1	1031.808502	1001.017	33.455224	0.022967	0.014331	0.017159	yes	1,2,3,4,5,...	73	0.145372
6	1031.615766	999.8849	31.926455	0.022195	0.014335	0.015767	yes	1,2,3,4,5,...	77	0.387533
14	1031.921230	1001.697	28.773247	0.024674	0.015426	0.014882	yes	1,2,3,4,5,...	57	0.118652
19	1031.850581	1000.473	26.602699	0.027308	0.016603	0.014817	yes	1,2,3,4,5,9	58	0.071498
24	1031.803410	999.8819	26.110944	0.027697	0.016994	0.014757	yes	1,2,3,4,5,9	58	0.060111
30	1031.840081	1002.059	26.092943	0.027261	0.016543	0.014652	yes	1,2,3,4,5,9	59	0.077068
40	1031.922330	1004.559	28.773294	0.025344	0.015170	0.015336	yes	1,2,3,4,5,...	57	0.093090
45	1031.652332	995.5470	33.288714	0.026855	0.016969	0.019057	yes	1,2,4,5,6,...	68	0.084391
49	1031.782369	998.4571	28.771397	0.027919	0.017435	0.016761	yes	1,2,3,4,9	55	0.123809
54	1031.727745	997.3741	30.707276	0.023343	0.015023	0.015433	yes	1,2,3,4,5,...	74	0.263197
57	1031.274142	998.7978	27.463167	0.027008	0.017246	0.015412	yes	1,2,3,4,5,9	57	0.110799
64	1031.076314	991.5177	34.709968	0.035956	0.022357	0.026854	yes	1,4,5,7,9	60	0.249414
66	1031.548154	993.0790	35.330443	0.034916	0.020859	0.026243	yes	1,4,5,7,9	61	0.149479
73	1031.619546	990.6503	29.521473	0.039436	0.031362	0.023687	yes	1,2,4,5	42	0.065571
76	1031.401784	988.6520	28.696908	0.054147	0.039204	0.027795	yes	2,4,5	37	0.198934
82	1031.448941	990.1578	26.283181	0.049115	0.033105	0.021958	yes	8,2,4,5	39	0.058369
87	1031.699376	993.8802	26.916922	0.033069	0.022098	0.017992	yes	1,2,4,5,9	50	0.357485
88	1031.407836	990.0176	24.720008	0.050729	0.035444	0.019264	yes	8,2,4,5	40	0.132402
92	1031.200007	991.7209	23.969794	0.049208	0.029015	0.017429	yes	8,2,4,5	42	0.059393
96	1031.397614	990.2915	22.153597	0.053682	0.035919	0.019679	yes	8,2,4,5	40	0.114169
99	1031.815425	1006.011	24.156830	0.030988	0.018448	0.016026	yes	1,2,3,4,5	60	0.062128
103	1031.724810	999.5023	22.179431	0.032419	0.020695	0.015926	yes	1,2,3,4,5	59	0.088143

Figura 5.27 – *Point Table*: informação quantitativa resultante da aplicação do algoritmo de ajustamento por feixes.

A ferramenta *Point Audit All* (Figura 5.28) é uma ferramenta importante na revisão do processo, dado que efectua uma análise individual de todos os pontos. Á medida que são verificados são seleccionados nas imagens onde foram medidos, possibilitando, deste modo, a detecção de erros grosseiros cometidos pelo operador, como por exemplo, medição errada de pontos de controlo.

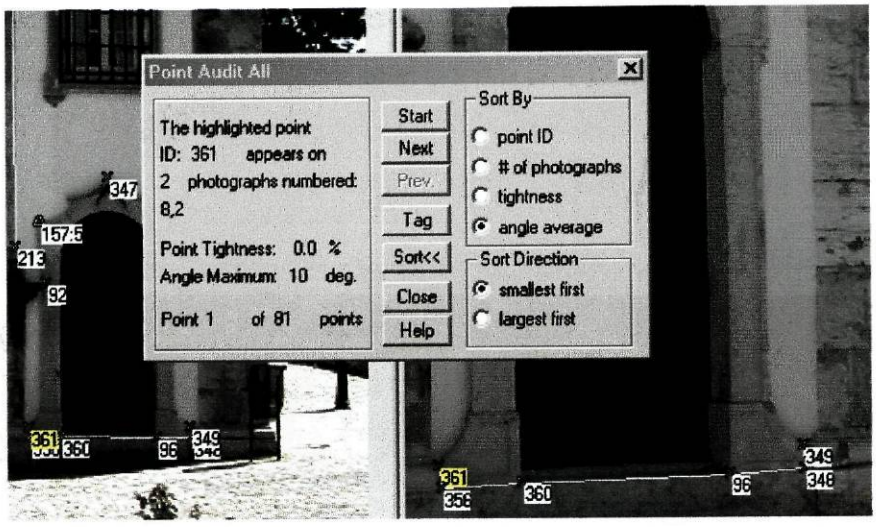


Figura 5.28 – *Point Audit All*: informação sobre os pontos (número de identificação, nº. das fotografias onde se encontra, etc).

c. Processamento de dados e restituição

Depois de orientadas as primeiras imagens importadas para o projecto no *PhotoModeler* prossegue-se com as etapas necessárias à reconstrução tridimensional de toda a igreja. O primeiro passo é a importação de mais imagens e a sua orientação pela medição de pontos de ligação e de controlo.

Com a orientação das imagens surge um certo apoio para facilitar a medição dos pontos de ligação, que tem por base as linhas epipolares que ficam conhecidas depois de efectuada a orientação. Quando se marca um ponto numa imagem e depois se quer medir nas outras adjacentes, o *software* prevê a sua posição e imediatamente traça a respectiva linha epipolar nas outras imagens, facilitando o trabalho de procura do ponto.

Depois de marcar um número significativo de pontos em cada imagem efectua-se novamente o processamento. Os resultados têm de ser novamente controlados para verificar que não existem problemas com as novas fotografias e medições. À medida que se aumenta o número de imagens e de medições a solução vai ficando mais robusta, pelo que se pode começar a desenhar outro tipo de entidades como sejam, linhas, arcos, pontos, cilindros e superfícies para que a forma geométrica do objecto em causa comece a surgir. Um exemplo da progressão do modelo pode ser visto através do visualizador 3D do *PhotoModeler*. A Figura 5.29 mostra um exemplo dessa evolução.

As superfícies, em particular, são de grande interesse no processo de reconstrução do modelo 3D e da restituição das fachadas: no primeiro caso, só criando superfícies é que é possível ver o modelo renderizado com um determinado material e textura, por exemplo a própria imagem rectificada para dar um aspecto realístico ao modelo; No segundo caso facilita o trabalho de restituição, pois uma vez

criada a superfície, cada linha ou curva que se desenhe dentro dessa superfície está automaticamente referenciada, poupando muito tempo ao evitar a referenciação linha a linha. No caso das curvas, as superfícies são ainda de maior valor, pois evita o desenho das curvas, ponto a ponto, em pelo menos três fotografias, para conseguir obter coordenadas 3D de cada ponto.

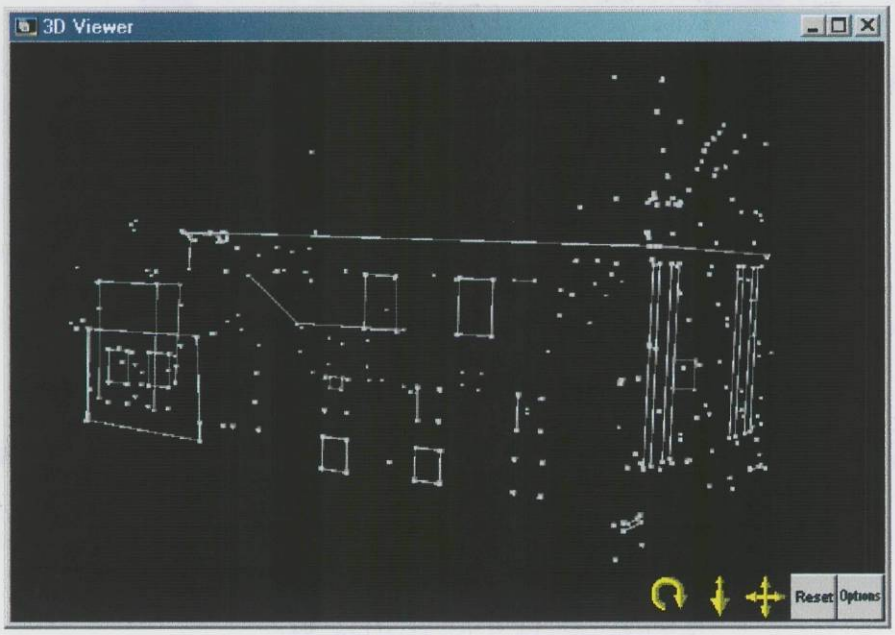


Figura 5.29 – Evolução do modelo 3D, visualizado no *3D Viewer*, à medida que se vão adicionando fotografias, pontos e linhas.

Para a criação foto-realística do modelo 3D, os pontos seleccionados para criar a superfície têm que ser obrigatoriamente coplanares, embora o mesmo não se aplique a todo o pormenor que fica contido na superfície. Quando o *software* coloca a fotografia nessa superfície, faz a sua rectificação a partir da informação das coordenadas dos vários pontos nela existentes, assegurando as várias profundidades. Para a restituição das fachadas é importante que o pormenor existente dentro da superfície esteja no mesmo plano da superfície, caso contrário a restituição ficará com graves deformações. Assim, tem de haver o cuidado de desenhar a superfície através de pontos que estejam no mesmo plano da fachada. Estas superfícies são desenhadas apenas numa das fotografias e imediatamente assumidas nas restantes que contenham os mesmos pontos que as formam. A restituição utilizando superfícies fica muito facilitada pois todo o pormenor existente dentro da mesma contém informação 3D, não sendo necessário a sua marcação em pelo menos mais duas fotografias.

Em termos de conclusão, a criação do modelo 3D ou da restituição das fachadas pressupõe sempre um processo iterativo, com novo processamento a ser efectuado à medida que se vão introduzindo novos dados (fotografias e pontos).

A Figura 5.30 mostra um exemplo de restituição resultante directamente do *PhotoModeler* bem como uma ampliação de uma determinada área. Pela sua análise torna-se bem visível a necessidade de posterior edição num *software* de CAD.

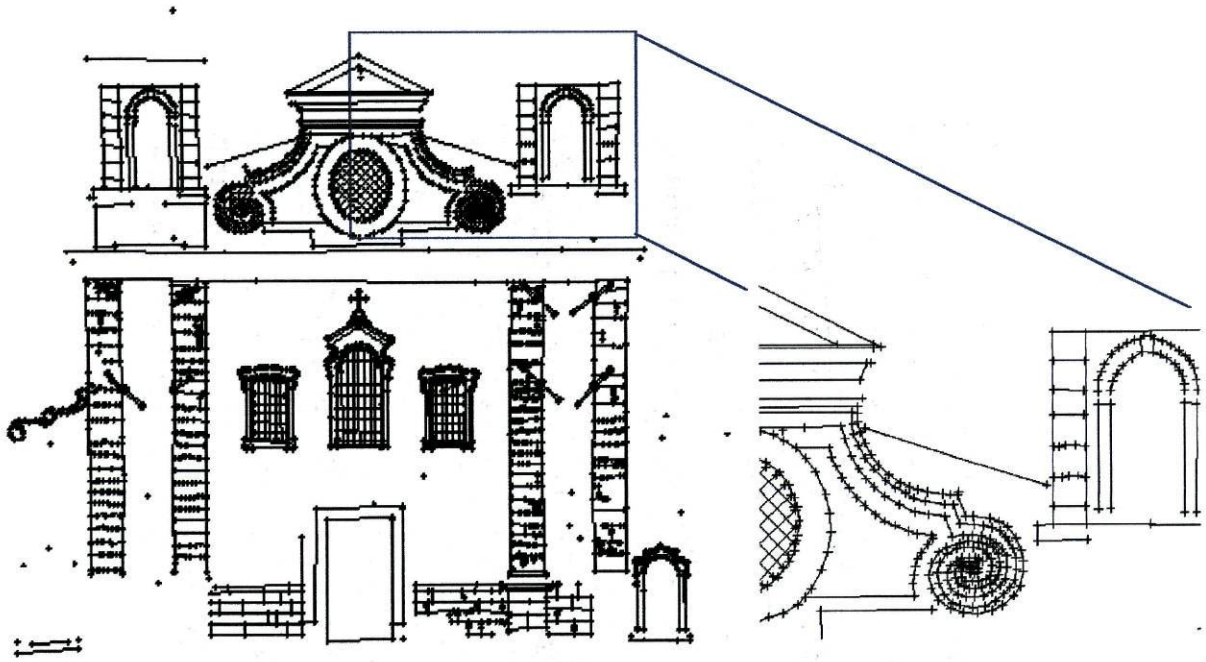


Figura 5.30 – Alçado da fachada principal e ampliação de uma dada zona.

Depois de concluído o processamento de todos os dados necessários à restituição de todas as fachadas, obtiveram-se os respectivos alçados da Igreja Matriz de Oeiras. Como foi anteriormente referido existe a necessidade de efectuar a sua edição, o que foi efectuado no *software AutoCad*. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 5.31 e 5.32 onde estão presentes, na primeira, os alçados Oeste e Sul e na segunda os alçados Norte e Este, à escala 1:100.

Outro dos produtos resultantes do processamento no *PhotoModeler* é o modelo 3D vectorial pormenorizado do monumento que pode ser visualizado nas Figuras 5.33, 5.34, 5.35 e 5.36 a partir de diferentes ângulos de visão.

De salientar que a parte superior do modelo, nomeadamente os telhados e os cimos das torres sineiras não está completo devido à falta de imagens suficientes que contenham esses elementos. Na realidade seria necessário a obtenção de imagens mais elevadas, pelo recurso, por exemplo, a gruas. Só assim seria possível obter o modelo 3D vectorial completo da Igreja.

Página deixada em branco propositadamente.



Alçado Oeste

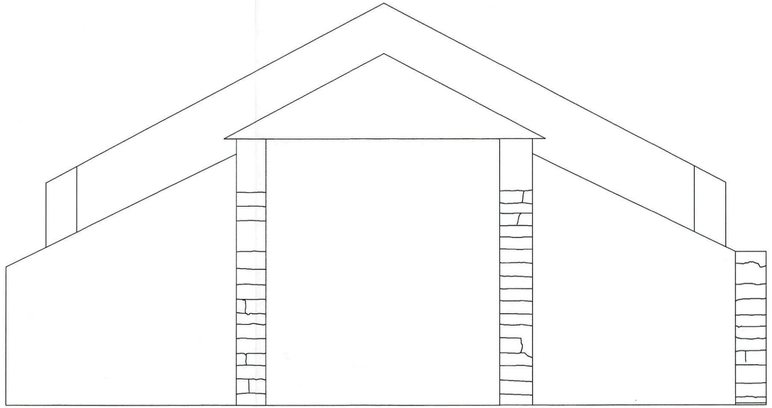


Alçado Sul

Figura 5.31 - Alçado Oeste (Esquerda) e Alçado Sul (Direita) da Igreja Matriz de Oeiras à escala 1/100



Alçado Norte



Alçado Este

Figura 5.32 - Alçado Norte (Esquerda) e Alçado Este (Direita) da Igreja Matriz de Oeiras à escala 1/100

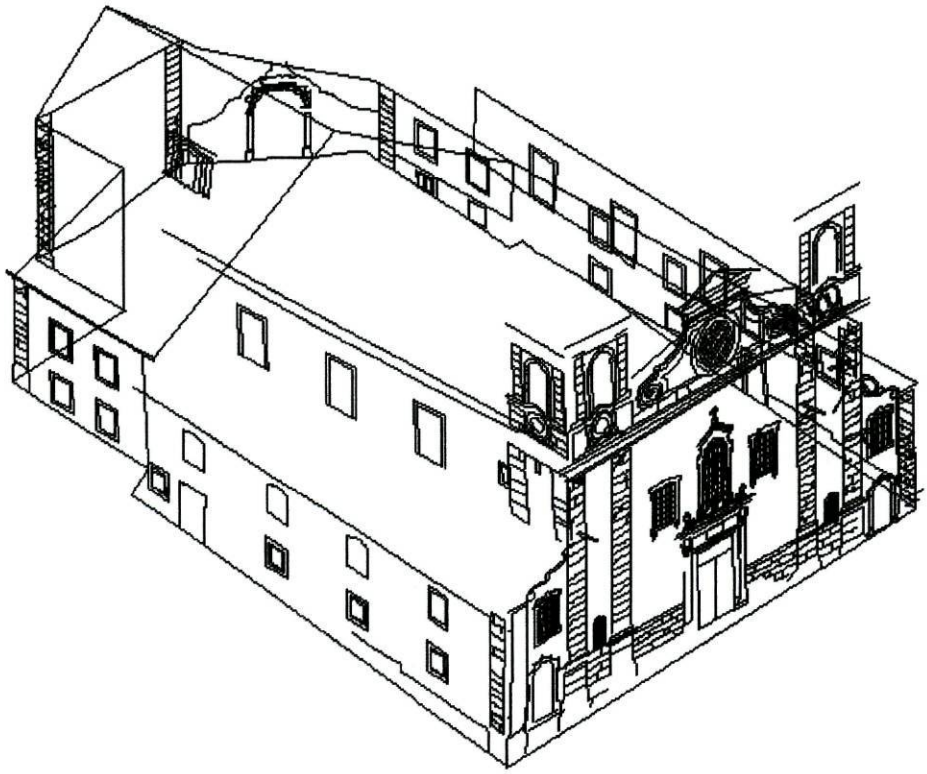


Figura 5.33 – Perspectiva NW do modelo vectorial da Igreja Matriz de Oeiras.

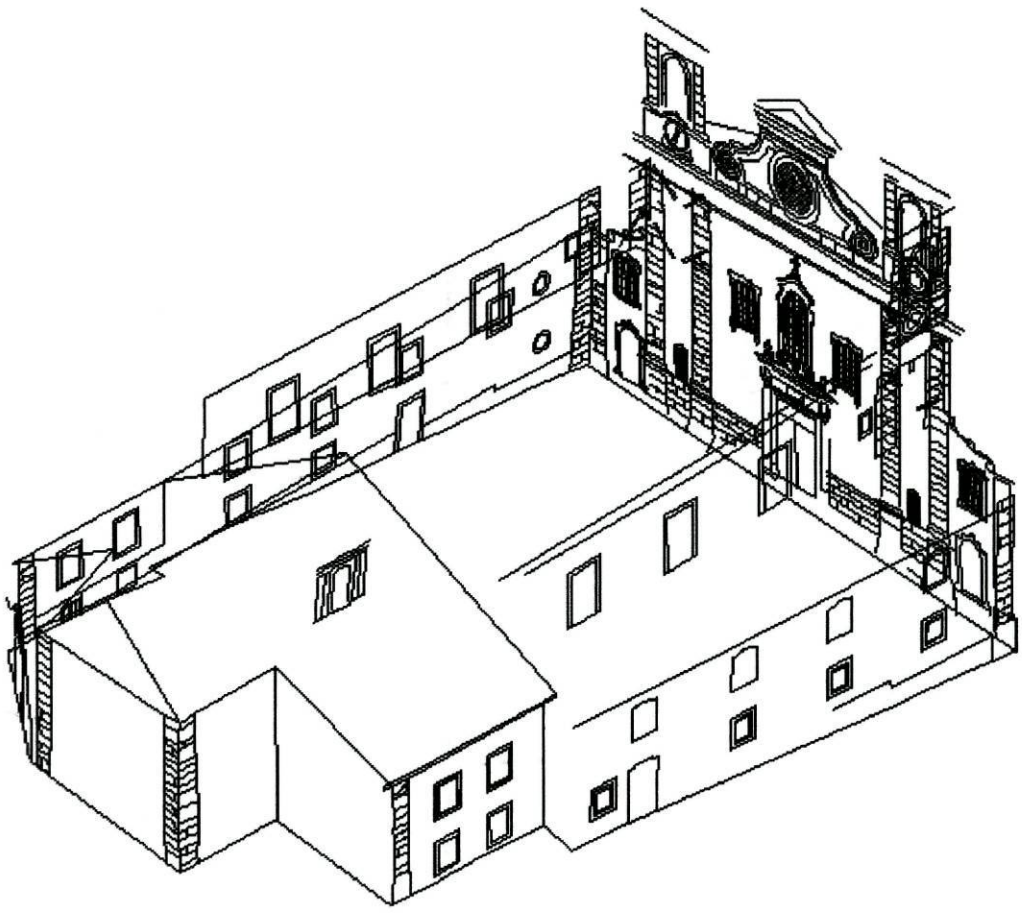


Figura 5.34 – Perspectiva NE do modelo vectorial da Igreja Matriz de Oeiras.

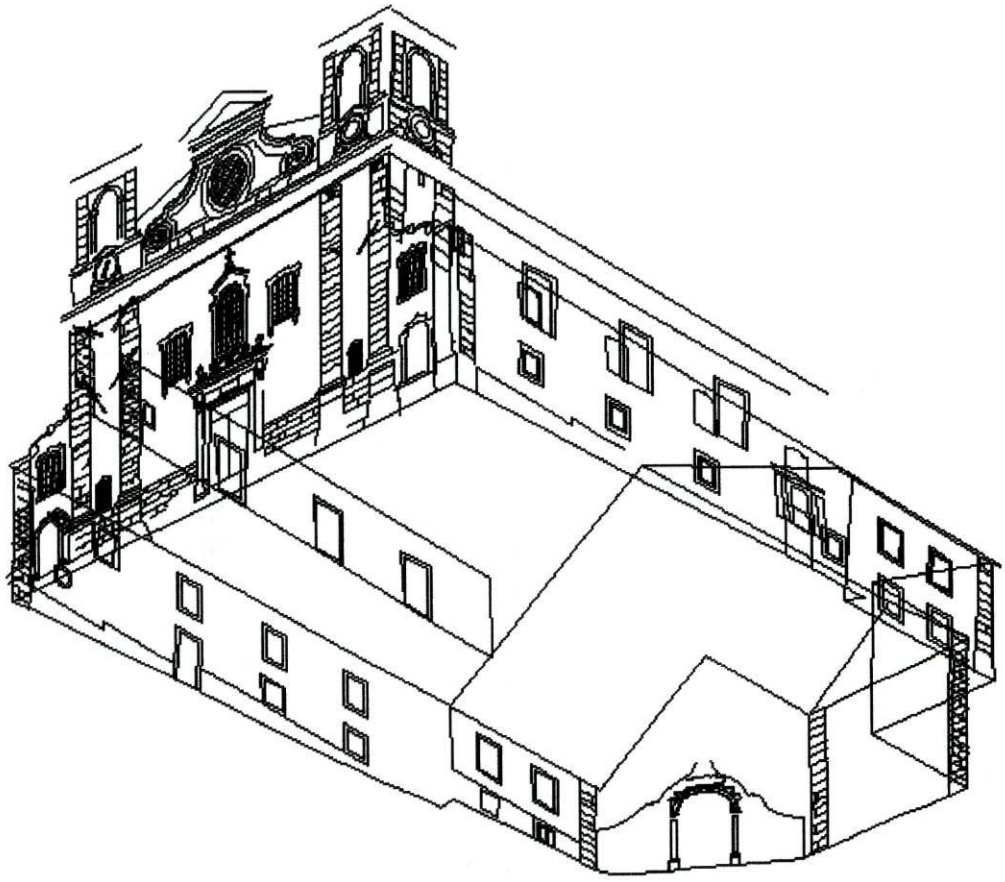


Figura 5.35 – Perspectiva SE do modelo vectorial da Igreja Matriz de Oeiras.

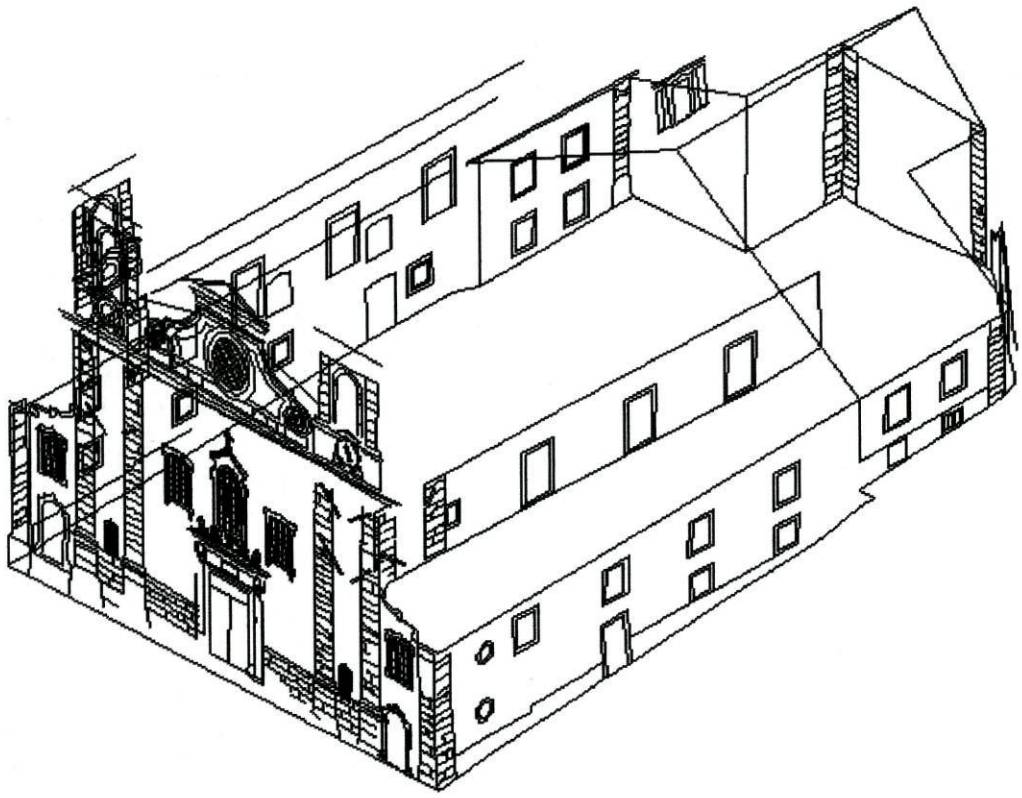


Figura 5.36 – Perspectiva SW do modelo vectorial da Igreja Matriz de Oeiras.

5.6 MODELO TRIDIMENSIONAL URBANO

A criação do modelo tridimensional dos edifícios que compõem a envolvente aos monumentos em estudo, pressupõe uma série de etapas que foram cumpridas ao longo do trabalho prático e que se encontram esquematizadas na figura 5.37.

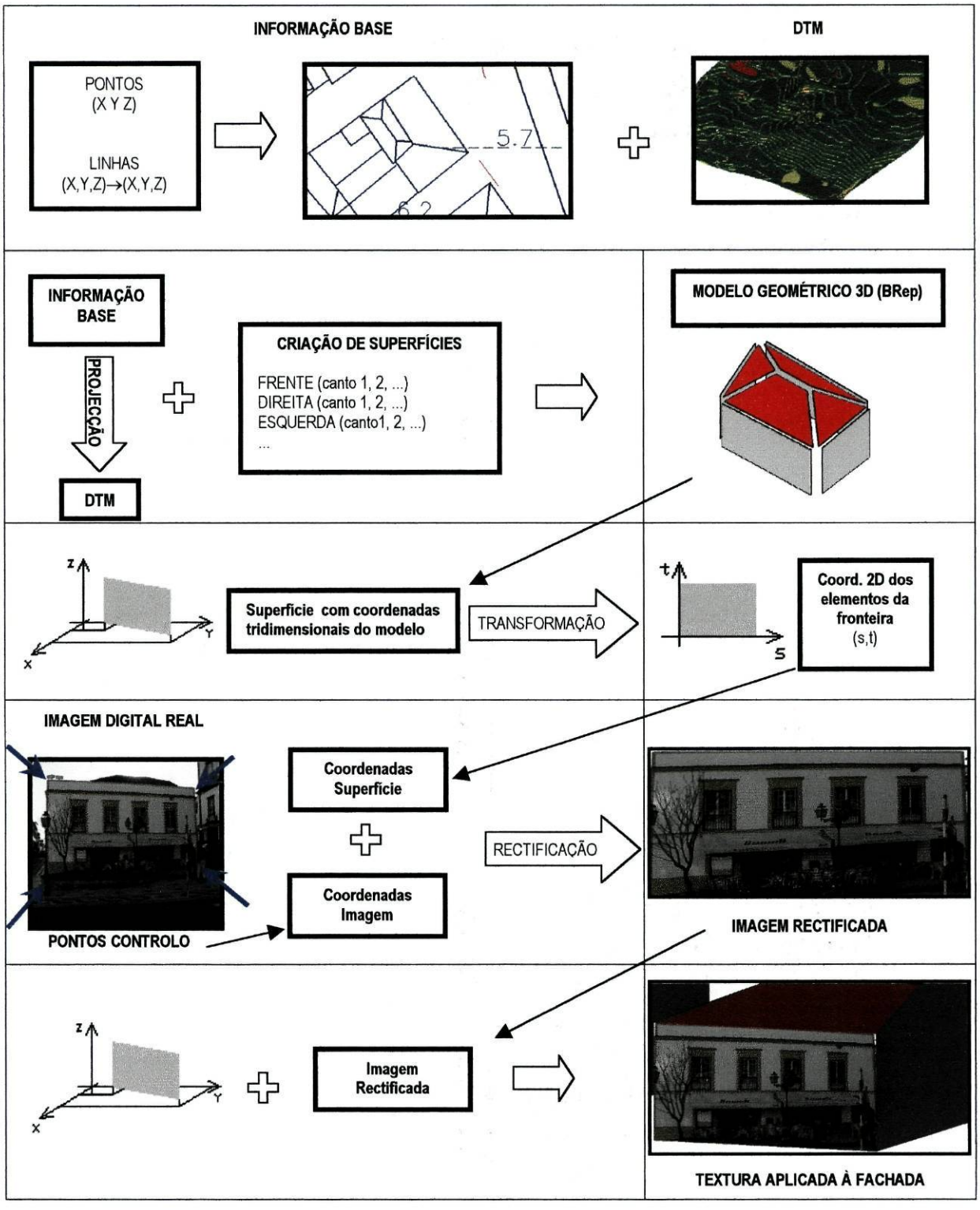


Figura 5.37 – Esquema representativo das etapas de reconstrução de edifícios para a criação do modelo 3D urbano com texturas reais.

Das etapas fazem parte a aquisição da informação base, a modelação geométrica do edifício, a renderização do mesmo pelo mapeamento de texturas e pela aplicação de algoritmos de *rendering*. No caso de mapeamento de texturas reais estas foram previamente rectificadas.

Segue-se uma breve descrição do que foi efectuado, na prática, em cada um dos processos referidos.

5.6.1 AQUISIÇÃO DE INFORMAÇÃO BASE

A informação base necessária para a reconstrução do edifício comporta a extracção de informação, em forma de pontos, linhas e polígonos, da forma (cantos) do edifício, morfologia dos telhados e respectivas alturas. Estes dados foram obtidos por restituição fotogramétrica através da orientação e processamento das fotografias aéreas, num processo idêntico ao descrito para a criação do arquivo arquitectónico pelo método estereoscópico.

No caso da cidade de Ponta Delgada o processamento e restituição foram efectuados num estereorestituidor analógico adaptado para trabalhar ligado a um computador (estereosrestituidor híbrido). Relativamente à cidade de Oeiras, o processamento e restituição foram efectuados numa estação fotogramétrica digital. De salientar que a envolvente às Igrejas de Oeiras e de Ponta Delgada é uma zona urbana bastante complexa e densa, pelo que a aquisição da informação base necessária para a modelação dos edifícios se torna bastante morosa.

Em ambos os casos foram extraídos tridimensionalmente os edifícios pela fronteira dos seus telhados bem como a morfologia destes. Também se extraiu os limites das estradas entre os edifícios. Estes serviram, no caso de Ponta Delgada para determinar a superfície inferior onde assentam os edifícios, tentando substituir, deste modo, o terreno. Para a zona envolvente à Igreja de Oeiras criou-se o modelo digital de terreno (MDT) (Figura 5.38) que servirá, portanto, de base à colocação dos edifícios modelados. Na Figura 5.39 pode visualizar-se um extracto da restituição da cidade de Oeiras – a) vista de cima e renderizada e b) vista de frente. Nesta última perspectiva pode verificar-se a existência de informação tridimensional respeitante à parte superior dos edifícios.

A informação base para o modelo 3D urbano das duas cidades foi feita tendo como plataforma de desenho o *software Microstation*.

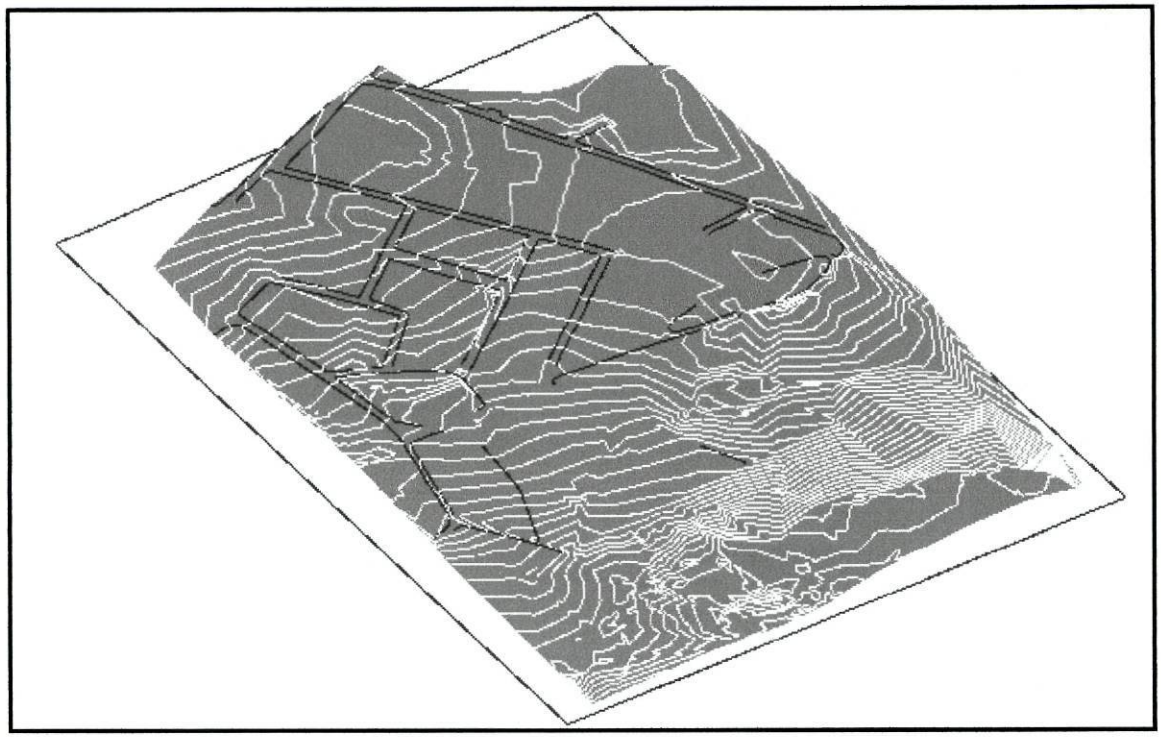
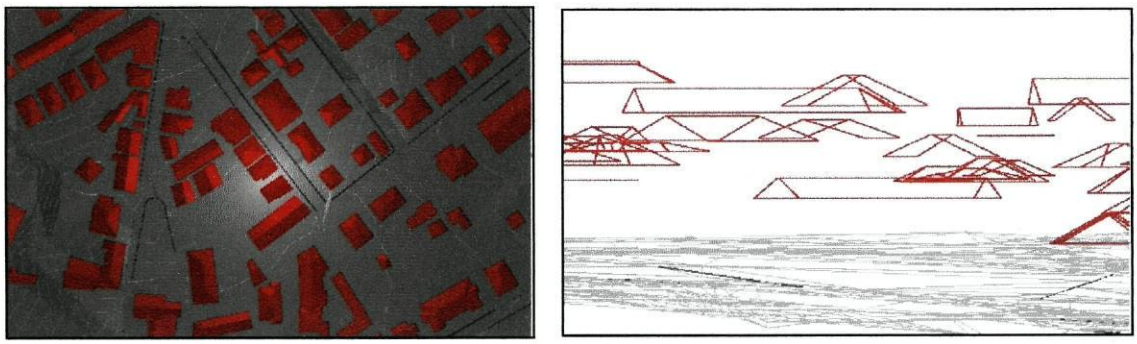


Figura 5.38 – Modelo digital de terreno de parte da cidade de Oeiras renderizado e com as curvas de nível sobrepostas, visualizado de uma determinada perspectiva.



a) b)

Figura 5.39 – a) renderização do resultado da restituição visto de cima; b) uma perspectiva de frente de forma a visualizar a informação 3D dos telhados dos edifícios.

5.6.2 MODELAÇÃO GEOMÉTRICA

A modelação geométrica dos edifícios que constituem o modelo 3D urbano da área envolvente às Igrejas foi efectuado no programa *Microstation J*. Este programa possui ferramentas muito úteis para desenho 2D bem como para modelação 3D, renderização e animação. É um modelador 3D híbrido, uma vez que permite a modelação por superfícies e/ou por sólidos para representar tridimensionalmente os objectos do mundo real. Permite a modelação a partir de primitivas base

(cubos, cilindros, esferas, cones...) para representar objectos simples de descrever. Com operações a partir destas primitivas é possível modelar objectos mais complexos, criando-se gradualmente modelos de superfícies e/ou volumes representativos de determinada realidade.

Neste trabalho, optou-se pela modelação por superfícies, uma vez que, após várias experiências, se concluiu ser o mais adequado para o mapeamento de texturas reais. Isto porque cada fachada é representada por uma superfície, que em conjunto com as restantes formam o edifício, e que não formando um único sólido se podem tratar individualmente (para cada fachada do edifício existe uma textura associada). Relativamente ao requisito da precisão posicional dos edifícios, este é perfeitamente cumprido quer se usem modelos de superfícies ou modelos de sólidos. Para além disso, neste caso específico, o objectivo não era descrever objectos do mundo real a partir das primitivas base, mas sim, modelar a realidade a partir de pontos, linhas e polígonos resultantes da restituição fotogramétrica. Para este tipo de modelação utilizaram-se ferramentas do *Microstation* especialmente concebidas para estes casos, optando-se sempre pelos modelos de superfície. A única excepção existente diz respeito a objectos com formas redondas, piramidais ou semi-esféricas (normalmente telhados em forma de cúpulas) que ficam melhor representados sendo modelados como sólidos de revolução. A Figura 5.40 mostra um exemplo desse tipo de objecto visto na fotografia aérea (esquerda) de onde foram restituídos os limites inferiores e superior e o respectivo modelo (direita) obtido com a modelação por sólidos de revolução.

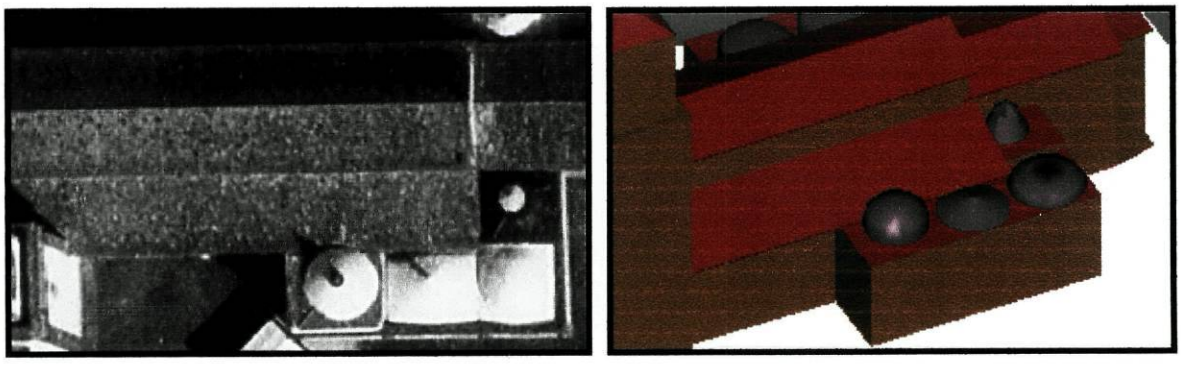


Figura 5.40 – Exemplo de objectos (cúpulas) que não foram modelados utilizando modelos de superfícies.

A modelação por superfícies, de linhas ou polígonos representativos de arestas dos limites superiores dos edifícios pressupõem duas etapas. A primeira etapa prende-se com a projecção (*Section by Projection*) desses limites no terreno, uma vez que o programa tem de saber qual o início e fim da superfície a desenhar. Para além disso, é esta projecção que permite definir o edifício como um todo, o seu início e o seu fim segundo a coordenada Z, ficando a conhecer-se, deste modo, a sua altura. Na Figura 5.41 pode visualizar-se o telhado de um dado edifício e a respectiva projecção no terreno.

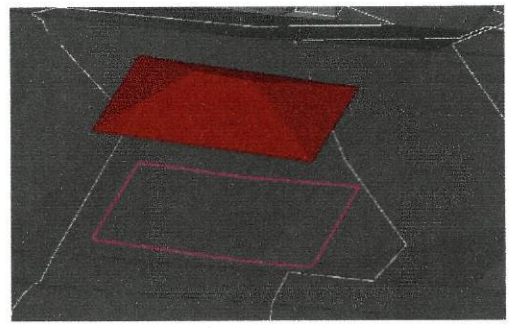


Figura 5.41 – Projecção dos limites do telhado no terreno.

A segunda etapa diz respeito à construção da superfície propriamente dita, para modelação da respectiva fachada. Esta construção pode ser efectuada de duas maneiras: manualmente, desenhando uma polilinha entre os quatro cantos da fachada de forma a criar uma superfície fechada ou então utilizando a ferramenta que permite a construção de superfícies por arestas (*Construct Surface by Edge*), onde é necessário indicar qual a aresta superior e inferior a partir das quais vai ser criada a superfície. A Figura 5.42 pretende mostrar o exemplo da superfície da fachada criada pela união dos cantos do telhado com os cantos projectados no terreno. Relativamente à modelação dos telhados, para que fiquem no desenho como superfícies e representem o mais fielmente possível o existente na realidade, recorreu-se à modelação manual através do desenho de polilinhas fechadas para cada uma das respectivas águas.

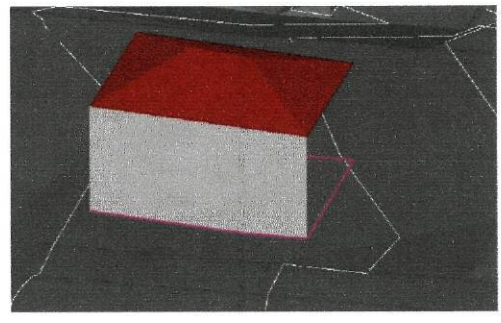


Figura 5.42 – Superfície criada entre uma das arestas do telhado e a respectiva projecção no terreno.

Após a conclusão do processo de modelação geométrica obtém-se o modelo tridimensional urbano da zona em questão. Nesta fase o modelo apenas pode ser renderizado com as cores que foram utilizadas no desenho das fachadas, uma vez que ainda não lhe foram aplicadas texturas.

A Figura 5.43 mostra o modelo tridimensional urbano da envolvente à Igreja Matriz de Ponta Delgada, enquanto na Figura 5.44 se pode visualizar o modelo 3D da envolvente à Igreja Matriz de Oeiras.

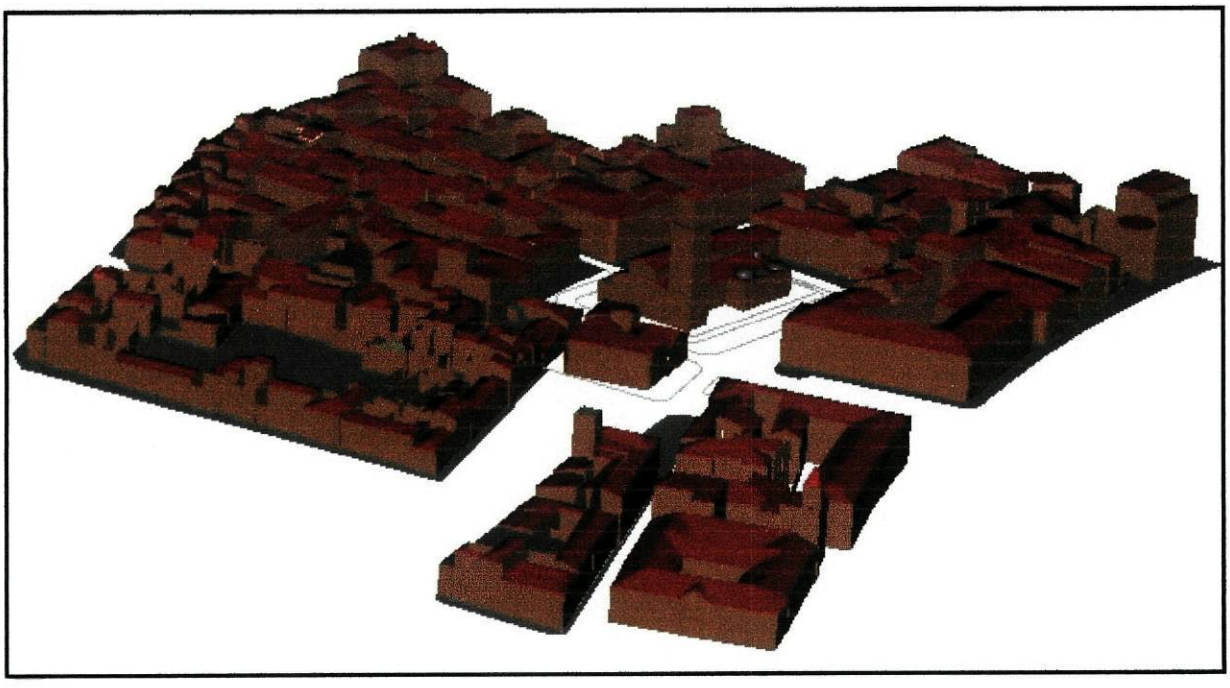


Figura 5.43 – Modelo 3D da envolvente à Igreja de Ponta Delgada renderizado com a cor utilizada na modelação.



Figura 5.44 – Modelo 3D da envolvente da Igreja de Oeiras renderizado com a cor utilizada na modelação.

5.6.3 RENDERIZAÇÃO

O processo de renderização pressupõe, como visto na secção 3.2.2, o mapeamento de texturas e a aplicação do algoritmo de renderização. No primeiro caso é necessário criar a textura a aplicar. O *software* possui, por defeito, uma série de texturas artificiais que designa por materiais, que vão desde a representação de tijolos e madeira até à representação de vidro. Neste caso particular, as fachadas dos edifícios mais próximos da Igreja são renderizados com texturas criadas a partir de fotografias reais. Os restantes edifícios, assim como os telhados, são renderizados com a cor natural que está associada às superfícies que os modelam. A escolha do algoritmo de *rendering* recaiu sobre o *Phong Shading* e o *Smooth-shaded*, dependendo das aplicações, pelas razões que serão apontadas no decorrer desta secção.

a. Criação da textura real

A criação de uma textura real exige o cumprimento de uma série de questões directamente relacionadas com o facto de se estar a lidar com fotografias. A Figura 5.45 mostra um diagrama dos principais passos realizados para a sua obtenção.

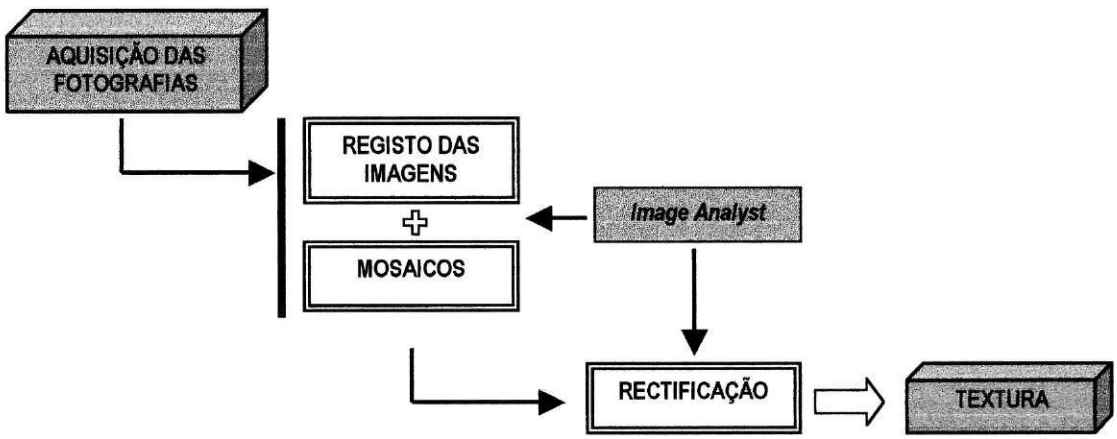


Figura 5.45 – Principais etapas para a criação de uma textura real.

O ponto de partida é, obviamente, a aquisição de fotografias das fachadas que se pretendem representar fotorealisticamente. As fotografias foram obtidas com a câmara digital Nikon Coolpix 750, cujas características estão descritas em 5.3.2, sendo uma câmara fotográfica que se encontra disponível no mercado a custos não muito elevados. As suas características de pequena angular determinam que, para a maior parte das fachadas, especialmente entre ruas, seja necessário a obtenção de várias fotografias para a cobertura de uma só fachada. A aquisição destas fotografias requer determinados cuidados uma vez que para criar uma única textura é necessário efectuar mosaicos das várias fotografias que constituem a fachada. Este facto exige que existam pelo menos

quatro pontos comuns entre as mesmas, sendo necessário, portanto que exista uma certa sobreposição entre as fotografias. Na figura 5.46 encontram-se as fotografias que foi necessário adquirir para cobrir apenas uma determinada fachada, sendo perfeitamente visível a sobreposição entre elas.



Figura 5.46 – Exemplo de fotografias adquiridas para criar a textura real a aplicar a determinada fachada.

Após a aquisição das imagens parte-se para o seu processamento digital com o objectivo de criar uma única imagem que, após ser rectificada para lhe eliminar as distorções resultantes do efeito de perspectiva, dá origem a uma só textura. O *software* utilizado é o *Image Analyst* que possui todas as ferramentas necessárias para realizar estas operações, tendo a vantagem, neste caso, de trabalhar sobre a plataforma *Microstation*.

Para que seja possível a criação de mosaicos a partir das imagens é necessário efectuar o registo de umas relativamente às outras. Este processo tem de ser feito utilizando duas fotografias de cada vez e utilizando pontos comuns. O registo é efectuado através de uma função de transformação de coordenadas, tendo-se constatado ser a transformação afim a mais adequada. No caso do exemplo da Figura 5.46, registaram-se primeiro duas a duas segundo a vertical (1 com 3 e 2 com 4) (Figura 5.47) e posteriormente registaram-se as duas resultantes do processo anterior. Após cada registo efectuou-se a operação que permite a criação de mosaicos ficando, deste modo, uma única imagem onde a sobreposição foi eliminada. O resultado final, para este exemplo particular, pode ser visualizado na Figura 5.48.



Figura 5.47 – Exemplo do registo das fotografias duas a duas (1 com 3 e 2 com 4 da Figura 5.48).



Figura 5.48 – Mosaico resultante das quatro imagens iniciais.

A fase seguinte diz respeito à rectificação do mosaico resultante das etapas anteriores, utilizando para pontos de controlo as coordenadas dos cantos da fachada já modelada, tomando para origem do novo sistema de referência o canto inferior esquerdo. A função de transformação usada foi a projectiva (Apêndice B) e para o preenchimento dos níveis de cinzento da nova grelha de pixels recorreu-se ao método de interpolação bilinear. A imagem fica, deste modo, rectificada e com as dimensões da fachada existente no modelo 3D, constituindo a textura real (Figura 5.49) que vai ser aplicada à respectiva fachada.



Figura 5.49 – Imagem rectificada resultante das quatro imagens iniciais.

b. Mapeamento da textura real

A aplicação da textura real nas fachadas pressupõe que a modelação geométrica das mesmas seja feita de uma maneira estruturada, por níveis e por cores, para facilitar a posterior associação entre a textura e a respectiva superfície.

O *Microstation* lida com as texturas como se fossem materiais para atribuir às superfícies. Assim, o mapeamento de texturas passa primeiro pela criação de um conjunto de materiais constituídos pelas diferentes texturas. O programa guarda todos os novos materiais formando o que designa por *palette*. Esta *palette* contém, portanto, todas as texturas criadas e que se querem aplicar às fachadas. Depois de criada a paleta de materiais, estes têm de ser associados à respectiva superfície no modelo 3D. Esta associação é feita através do nível e da cor da superfície, sendo sempre possível pré visualizar a textura que se está a atribuir. A atribuição do material à superfície pode também ser feita de uma forma manual, escolhendo na paleta de materiais a textura e no desenho a respectiva superfície. Este processo torna-se bastante mais moroso que o anterior.

c. Aplicação do *rendering*

O *Microstation* possui por defeito vários algoritmos de *rendering*, no entanto, apenas alguns deles podem ser usados com texturas, pelo que o leque de escolhas fica relativamente apertado. Segundo o manual, os dois algoritmos que dão ao modelo um aspecto mais realístico são o *Phong* e o *Smooth*. A diferença entre eles reside na maneira como calculam a cor e intensidade de cada pixel da cena a renderizar. No primeiro método esse cálculo é efectuado para cada pixel individualmente fazendo com que a imagem resultante tenha uma qualidade muito elevada. No segundo método, o cálculo da cor e intensidade é efectuado para cada um dos vértices da superfície sendo depois misturados pelo seu interior. As imagens resultantes têm assim uma qualidade inferior às obtidas pelo método *Phong*, sendo no entanto o tempo de execução do *rendering* bastante inferior. O método *Phong* é, sem dúvida, o que melhor apresenta o fotorealismo das imagens geradas. Contudo, a complexidade de cálculo faz com que o tempo necessário para a renderização de uma dada cena possa ser elevado, pelo que por vezes a relação tempo-qualidade pode não compensar. Isto é verdade especialmente para aplicações de visualização em tempo quase real. Após várias experiências optou-se por utilizar o método *Phong* para todas as imagens a apresentar em papel, uma vez que a rapidez não é considerada importante. O método *Smooth* foi utilizado para as animações e filmes por requererem renderização de vários fotogramas por segundo, para que não se perceba a mudança de sequência.

Associado a cada um dos métodos de *rendering* existem ainda outros factores importantes como a iluminação da cena a renderizar e que podem ser pré-definidos. A iluminação se for bem escolhida

ajuda a aumentar ainda mais o fotorealismo das imagens renderizadas, uma vez que determina o que se vê por ser a fonte de iluminação. Existem essencialmente três tipos de iluminação que podem ser escolhidos no *Microstation*: a luz ambiente e/ou solar, um ponto de luz (formando um cone) e uma luz projectada no centro da vista que permite a noção da 3ª dimensão. É possível efectuar estudos sobre a posição solar, o dia e a hora de forma a simular a visualização do modelo em qualquer altura do ano e do dia. A sequência de imagens da Figura 5.50 pretende ilustrar os diferentes efeitos gerados pela utilização independente e conjunta da luz ambiente e da luz projectada no centro da vista. De salientar que no caso de se eliminar a luz ambiente, a imagem fica bastante escura, mas salienta a noção tridimensional dos telhados (Figura 5.50a)), e no caso de se manter a luz ambiente mas se retirar a luz projectada no centro da vista perde-se a noção 3D dos telhados (Figura 5.50 b)). Assim, conclui-se que a conjugação dos dois tipos de luz permite uma visualização mais realística no que respeita à luminosidade (Figura 5.50c)).



a) b) c)

Figura 5.50 – Imagens elucidativas da variação de luminosidade devida à escolha de diferentes tipos de luz.

Os resultados obtidos após o processo de renderização aplicado ao modelo 3D obtido na modelação geométrica vão ser apresentados seguidamente, sob a forma de algumas figuras elucidativas dos mesmos.

Começa por se apresentar na Figura 5.51 um pormenor da Igreja Matriz de Ponta Delgada renderizada com texturas obtidas a partir de fotografias reais e visualizada de uma determinada perspectiva.

Na Figura 5.52 apresenta-se uma vista geral do modelo 3D da envolvente à Igreja de Oeiras onde é visível a renderização das fachadas, com texturas reais, da Igreja e de alguns edifícios. Nas Figuras 5.53 e 5.54 e 5.55 podem visualizar-se pormenores do modelo 3D com a Igreja e alguns edifícios que a rodeiam.



Figura 5.51 – Pormenor da fachada Sul da Igreja de Ponta Delgada.

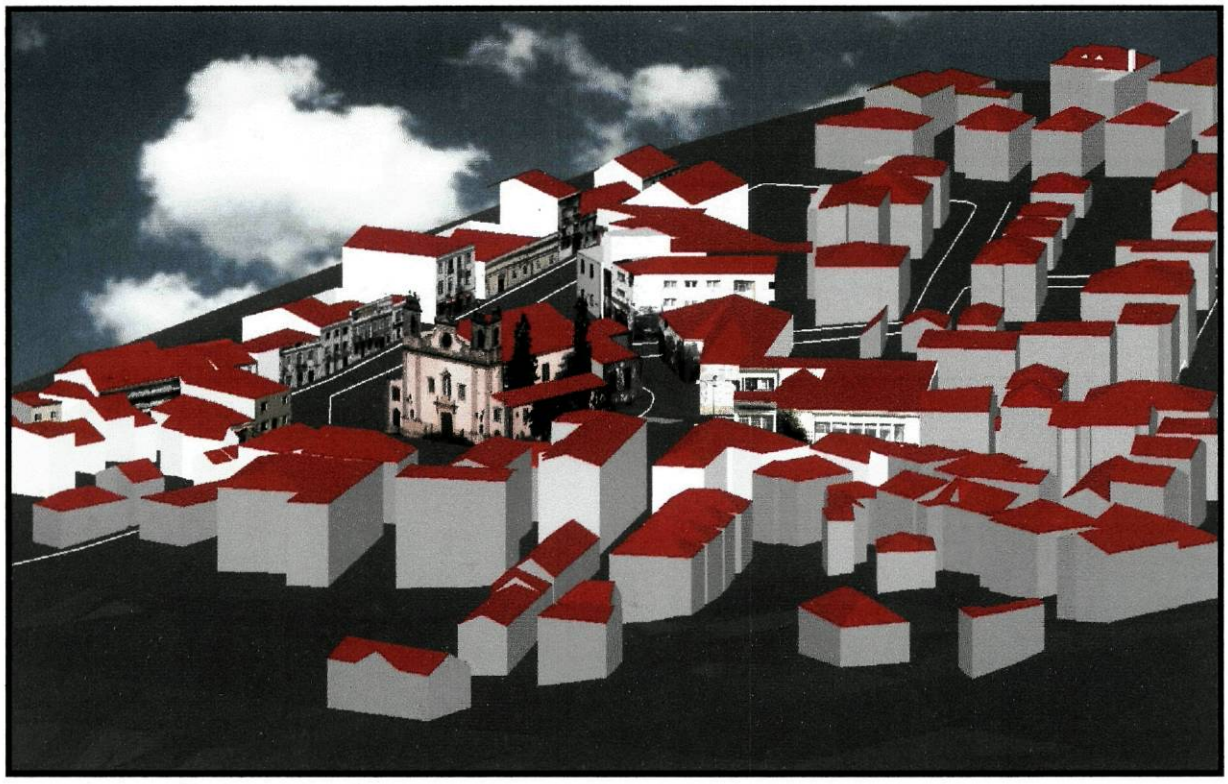


Figura 5.52 – Modelo 3D da zona que rodeia a Igreja Matriz de Oeiras.



Figura 5.53 –Pormenor da Igreja Matriz de Oeiras vista com a mesma perspectiva da Figura 5.52.



Figura 5.54 – Pormenor do modelo 3D da Igreja Matriz de Oeiras e sua envolvente.



Figura 5.55 – Pormenor do modelo 3D da Igreja Matriz de Oeiras de uma perspectiva NE.

As Figuras 5.56 e 5.57 mostram extractos do modelo 3D de Oeiras visto de dois ângulos de visão diferentes.



Figura 5.56 – Modelo 3D da Igreja Matriz de Oeiras de uma perspectiva NW.



Figura 5.57 – Modelo 3D da Igreja Matriz de Oeiras de uma perspectiva SE.

5.7 VISUALIZAÇÃO

A abordagem ao tema da visualização é feita de um modo prático e sob a óptica do utilizador, sempre com a perspectiva de mostrar que as novas tecnologias existentes para divulgação de dados, nomeadamente as multimédia, constituem uma ajuda na valorização do registo convencional do arquivo arquitectónico, podendo constituir óptimos meios de posterior investigação, além de serem visualmente muito mais atraentes e motivadoras.

Neste trabalho, a visualização constitui, portanto, um complemento ao arquivo arquitectónico como meio de divulgação e também de integração com o modelo tridimensional urbano da zona envolvente.

Os produtos resultantes das tecnologias de visualização aplicadas neste caso particular, resultam essencialmente do uso das potencialidades existentes no *software Microstation*, nomeadamente no que diz respeito a animações bem como à exportação do modelo 3D para VRML, e do uso do *software Macromedia Director* para a realização do CD multimédia. Para a visualização do modelo em VRML recorreu-se ao *plug-in Cosmoplayer*, distribuído livremente, e muito útil para a divulgação de dados tridimensionais via Internet.

5.7.1 ANIMAÇÕES

As animações criadas neste trabalho têm como objectivo a visualização da Igreja Matriz de Oeiras integrada na sua envolvente urbana, dando a conhecer às pessoas, pela realização de passeios virtuais, o estilo arquitectónico da mesma bem como dos edifícios existentes nas suas imediações. A animações resultantes são gravadas em formato de filme (AVI) e são depois integradas na aplicação multimédia criada (5.7.3). As animações foram efectuadas integralmente no *Microstation* dado que este possui ferramentas bastante completas para o efeito, que vão desde a permissão de criar percursos até à possibilidade de definir a câmara que vai ser utilizada para o visualizar bem como a altura do visualizador. A ideia é conseguir visualizações e animações o mais realistas possível, pelo que só podem ser realizada após a completagem do processo de renderização da secção 5.6.3.

A animação não é mais do que um determinado número de imagens fixas relacionadas que, quando vistas em sucessão rápida dá a ilusão de movimento. A cada uma destas imagens dá-se o nome de fotograma. No entanto, para criar uma animação de poucos segundos com o mínimo de movimento fluído é necessário um número elevado de fotogramas, entre 15 a 30 fotogramas por segundo. Na figura 5.58 pode ver-se um percurso definido pelo utilizador e o número de fotogramas (a magenta) que vão ser criados pelo *software* para criar a ilusão de movimento.

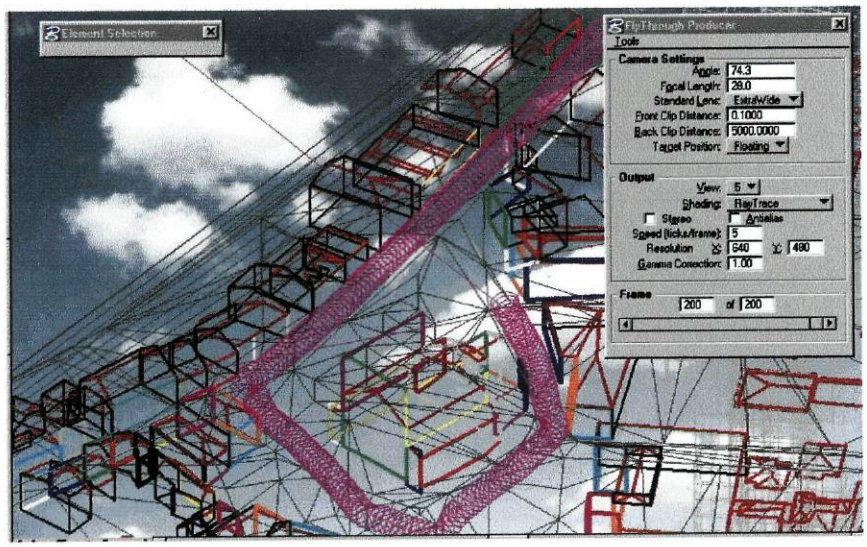


Figura 5.58 – Exemplo de um percurso definido pelo utilizador e respectivos fotogramas.

As animações criadas sobre o modelo de Oeiras serão visualizadas aquando da apresentação do CD Multimédia, uma vez que não é possível a sua visualização em papel.

5.7.2 VRML – *COSMOPLAYER*

A Internet é um meio privilegiado de divulgação uma vez que é acedido por muitos utilizadores por todo o mundo. A maneira possível para que dados tridimensionais sejam difundidos nesse meio electrónico é utilizando a linguagem VRML. Os *scripts* de VRML têm depois de ser interpretados por um *software* criado para o efeito. Existem vários *softwares* que permitem descodificar a linguagem VRML, alguns deles livremente distribuídos via Internet, como por exemplo, o *CosmoPlayer* e o *GLView*.

O *CosmoPlayer* é portanto um *plug-in* que permite a visualização de dados no formato VRML. O *software Microstation* permite a exportação do modelo 3D criado para o formato VRML que pode depois ser visualizado no *Cosmoplayer*. Este permite a visualização interactiva do modelo, dado que possui ferramentas de controlo de movimento, divididas por duas interfaces diferentes, que permitem ao utilizador "navegar" pelo mesmo. Como exemplo tem-se o *zoom* para poder ver pormenores do modelo, o *pan* para poder movimentar o modelo no monitor, o *rotate* para poder visualizar o modelo de várias perspectivas e o *seek* que faz uma aproximação rápida ao objecto seleccionado, entre muitas outras possibilidades. A Figura 5.59 mostra um extracto do modelo 3D de Ponta Delgada em ambiente do Cosmoplayer, onde são visíveis alguns dos comandos que se podem utilizar para examinar o modelo. O modelo está apenas renderizado com as cores da modelação. Na Figura 5.60 pode visualizar-se o modelo 3D de Oeiras renderizado com as texturas reais.

Neste caso particular foi necessário editar o *script* para eliminar as linhas de código referentes à textura que está aplicada no ecrã do *Microstation* pretendendo simular o céu e que não era entendida pelo *CosmoPlayer*, dando erro no ficheiro.

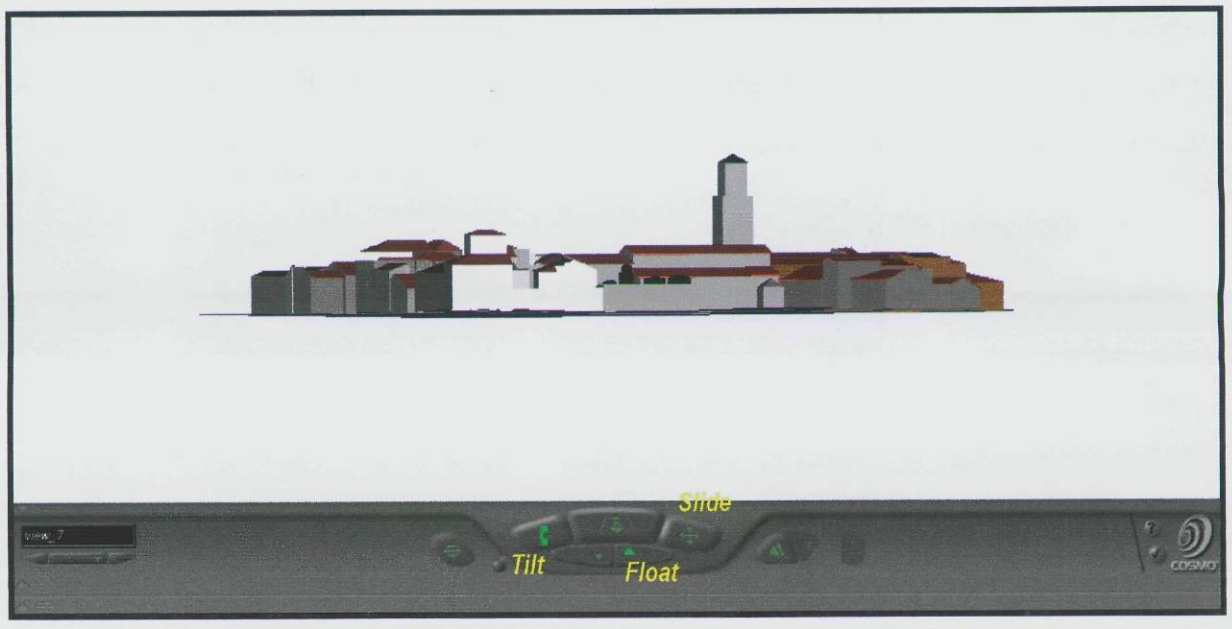


Figura 5.59 – Visualização de um extracto do modelo 3D não texturizado no *CosmoPlayer*.

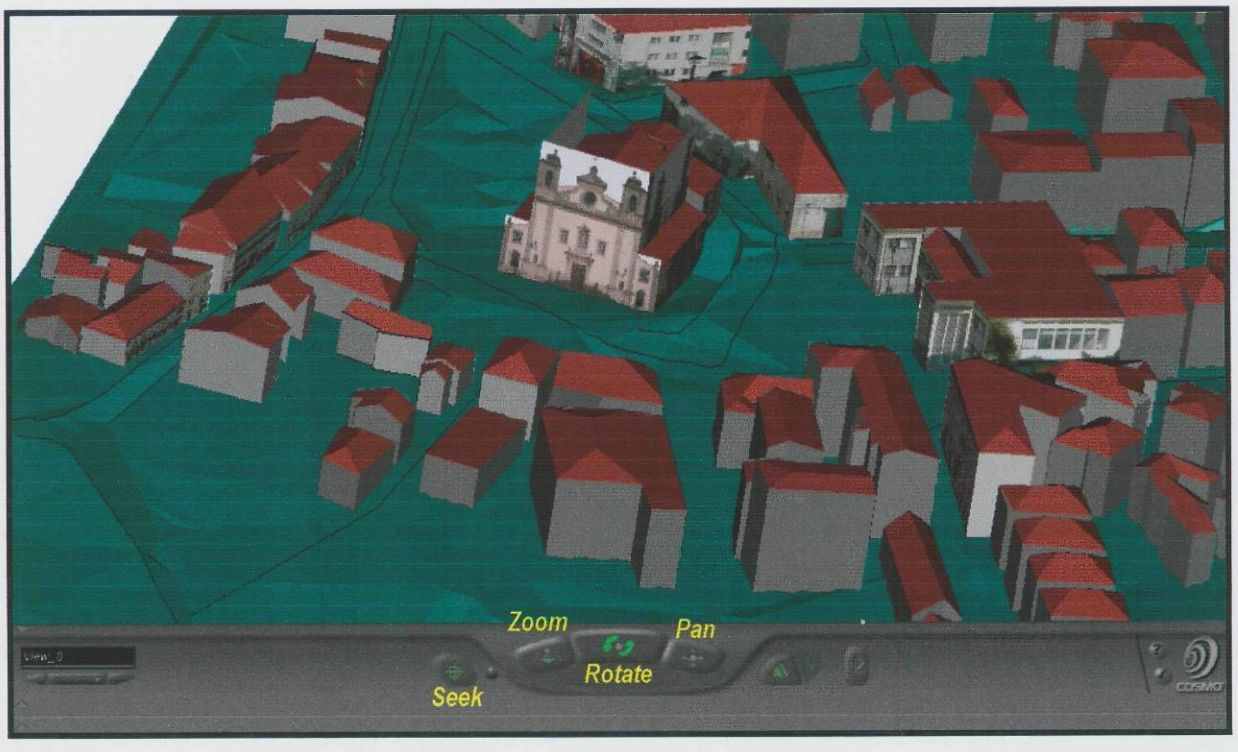


Figura 5.60 – Visualização de um extracto do modelo 3D com texturas reais no *CosmoPlayer*.

5.7.3 CRIAÇÃO DO REGISTO MULTIMÉDIA DO ARQUIVO ARQUITECTÓNICO

O registo multimédia do arquivo arquitectónico tem como objectivo integrar o processo de documentação e apresentação tradicionais em aplicações com interfaces amigáveis, onde os especialistas (arquitecto, historiador, etc.) podem aceder à informação num formato idêntico ao que estão habituados e, onde, para além disso, podem usufruir de informação adicional através de modelos tridimensionais do monumento e sua envolvente.

O registo multimédia baseia-se em conteúdos clássicos como textos, plantas, alçados e imagens, e outros menos clássicos como modelos 3D vectoriais e renderizados com imagens rectificadas, de forma a apresentar ao utilizador não só informação geral dos monumentos, mas também, e sobretudo, detalhes construtivos com a precisão requerida para o arquivo arquitectónico, no sentido de elaborar um documento suficientemente aproximado e fidedigno do monumento e da sua envolvente.

Deste modo, para o registo multimédia da arquivo arquitectónico da Igreja Matriz de Oeiras foram considerados todos os produtos finais resultantes da criação do arquivo arquitectónico, nomeadamente as imagens adquiridas, que representam um meio de registo fidedigno do monumento à data da sua aquisição, os alçados das suas fachadas obtidos pela fotogrametria, com a precisão e escala exigidas para a formação do arquivo arquitectónico. O modelo 3D vectorial e pormenorizado do edificio é também tido em consideração uma vez que permite uma visão mais abrangente do monumento como um todo, completado com a aplicação de texturas reais, formadas a partir de imagens rectificadas das fachadas.

Para a inserção do monumento no seu meio envolvente elaborou-se o modelo tridimensional da zona, essencialmente urbana, permitindo uma melhor caracterização geral do conjunto, através de animações criadas no *Microstation* e trazidas para o registo multimédia pela criação de pequenos filmes.

A estruturação de toda a informação referida, bem como algum texto histórico sobre o monumento e a cidade, foi efectuada no *software Macromedia Director*, que possibilita a combinação de texto, som, gráficos, animação e vídeo numa só aplicação. Devido à grande quantidade de informação que este tipo de ficheiros requer, o resultado é apresentado ao utilizador através de suporte CD-Rom, também como meio de fácil divulgação.

O *Macromedia Director* é um *software* que permite a realização de uma aplicação multimédia em analogia à realização de um filme. Por esta razão, todos os termos usados ao longo do processo são análogos aos utilizados na realização e produção de um filme. É necessário possuir actores (*members*, *cast members* ou elementos), elenco (*cast*), o guião (*score*), a personagem (*sprite*), a(s) cena (s)

frame(s) e o enquadramento físico numa cena (*channel* ou canal). Neste caso particular, os actores são o texto, as imagens, as animações e os sons, e o elenco é o conjunto destes elementos. A coordenação da aplicação vai ser efectuada no *score*, onde são especificados os comportamentos e características que cada elemento vai desempenhar, em que parte da aplicação (do filme) vai entrar ou até mesmo quantos actores vão entrar em determinada cena. A *frame* representa um instante de tempo e o *channel* uma posição espacial numerada no *score*, para distribuir os elementos dado que estes não podem ocupar o mesmo espaço físico. A *sprite* diz respeito à função ou missão de um elemento, como por exemplo, onde se encontra, quando e durante quanto tempo. Este *software* tem também a possibilidade de programação, através da linguagem Lingo (Rozenzweig, 2001), permitindo controlar de um modo muito detalhado as *sprites* e outros elementos de um filme.

A Figura 5.61 mostra o ecrã do *Director* onde são visíveis a grande variedade de janelas, menus e caixas de diálogo que permitem a realização da aplicação multimédia. Salientam-se as janelas principais, onde se integram as *sprites* (*Score*), os elementos (*Cast*) e onde decorre a acção (*Score*).

Na janela *Stage* vão colocar-se todos os elementos multimédia que constituem o elenco (janela *Cast*). Esta é a janela que o futuro utilizador da aplicação irá visualizar, uma vez que não terá acesso ao trabalho de "bastidores". É no *Stage* que se vai tendo a noção da evolução da aplicação, bem como do resultado final.

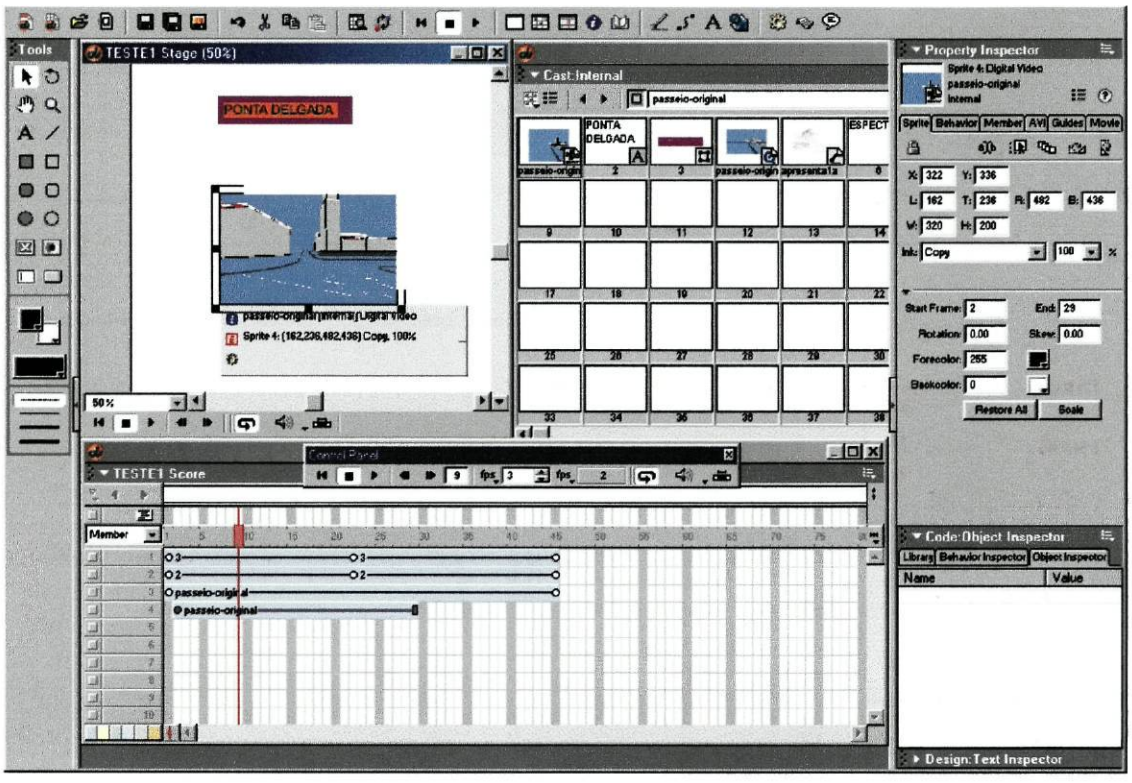


Figura 5.61 – Ecrã principal do *Macromedia Director*.

A janela *Cast* engloba todos os elementos que se vão incluir no filme, tais como desenhos gráficos ou imagens, elementos de interface (botões e ícones), texto, sons, animação, paletas de cor, filmes do *Director* (um filme do *Director* pode incluir outros). Assim, esta janela não é mais do que uma base de dados de elementos que se vão utilizar ao longo da aplicação.

A janela *Score* é sem dúvida a mais importante, uma vez que é aqui que o projecto toma forma. Se por um lado, no *Stage* se observa o filme criado e no *Cast* se incorporam os elementos que fazem parte do mesmo, é no *Score* que se desenvolve todo o processo, funcionando, deste modo, como centro de produção do filme. Quando o *Director* executa um filme, o que faz é interpretar a informação contida no *Score*. Dada a importância deste, descreve-se resumidamente alguns dos seus aspectos importantes, visíveis na Figura 5.62.

A janela *Score* tem no início uma informação geral sobre a *sprite*. Nas duas secções seguintes é constituída por uma série de linhas e colunas chamadas canais e *frames*, respectivamente. Cada frame tem um número associado (marcado em intervalos de 5) e cada canal começa também por um número ou, no caso dos canais de efeitos, por um ícone. Os elementos do filme têm de ser colocados nas células do *score* para que se passe alguma coisa no *stage*. Nos canais são colocados os elementos que vão constituir a aplicação, que passam a ser designados por *sprites* e que vão ter determinados desempenhos no decorrer do filme. As *frames* determinam a altura em que os elementos aparecem no filme. Os canais de efeitos são utilizados para controlar eventos invisíveis ao utilizador como elementos de som, transições de *frames* e tempo.

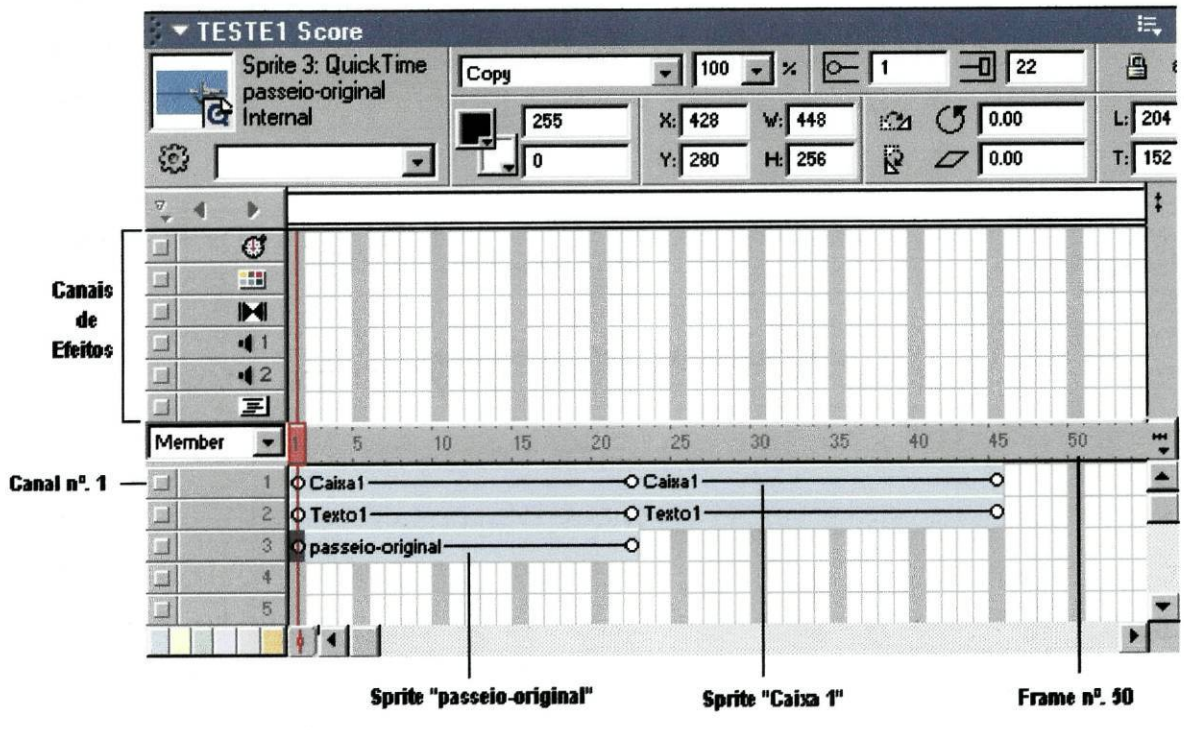


Figura 5.62 – A janela *Score*.

Para o controlo da movimentação do filme recorre-se à janela *Control Panel* (Figura 5.63), que fornece indicações importantes sobre a performance do mesmo, não tendo, no entanto, qualquer influência no comportamento da aplicação final. Esta janela serve apenas como um auxílio à antevisão da aplicação.

O *Director* possui ainda uma série de ferramentas de auxílio à criação da aplicação, nomeadamente bibliotecas para controlar o comportamento das *sprites*, ferramentas para criar *bitmaps*, importar sons, vídeos e construir qualquer tipo de botões configurados para efectuarem qualquer tipo de acção.

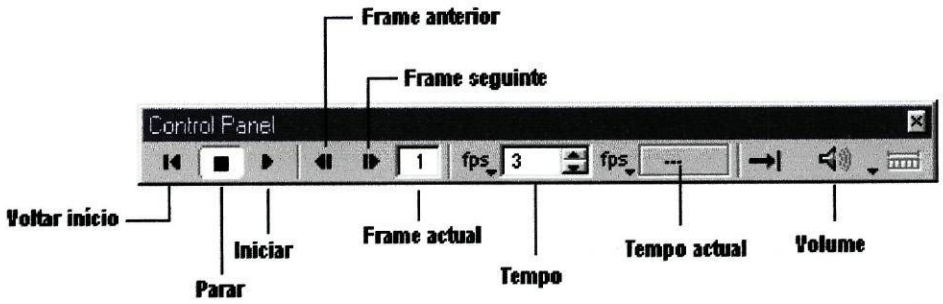


Figura 5.63 – A janela *Control Panel*.

Na prática, quando o filme é inicializado o *score* é percorrido da esquerda para a direita para que a informação aí contida seja processada.

Depois de finalizada a aplicação, esta tem de se converter num ficheiro cujo formato seja acessível a todos os utilizadores, independentemente de terem ou não o *Director* instalado no seu computador. O ficheiro nativo de extensão *.dir* é, por essa razão, convertido para um formato executável *.exe*.

A aplicação multimédia criada com o Director tem presente toda a informação resultante da elaboração deste trabalho prático, bem como alguma informação histórica referente ao monumento em questão e à sua envolvente. Toda a informação apresentada sobre a Igreja Matriz de Oeiras está dividida em algumas secções, nomeadamente:

Localização – breve explicação com recurso a imagens, texto e animação para mostrar a localização de Oeiras e da respectiva Igreja Matriz;

História – algum enquadramento histórico que permita compreender a origem da Igreja e a relação com a sua envolvente e com a cidade;

Arquivo arquitectónico – onde se podem visualizar algumas das imagens que deram origem aos produtos finais também presentes nesta secção. Começa por se visualizar a Igreja Matriz inserida no modelo 3D urbano da zona envolvente, efectuando-se uns pequenos passeios pela ruas que a envolvem. Surge também o modelo 3D pormenorizado da Igreja que dará oportunidade ao utilizador de seleccionar cada uma das fachadas e visualizar os respectivos alçados, bem como visualizar os

modelos tridimensionais da Igreja, um obtido pela modelação geométrica a partir de dados obtidos com a fotogrametria aérea e o outro obtido pela fotogrametria terrestre.

A figura 5.64 mostra um exemplo da interface geral da aplicação "Igreja Matriz de Oeiras – Arquivo Arquitectónico".

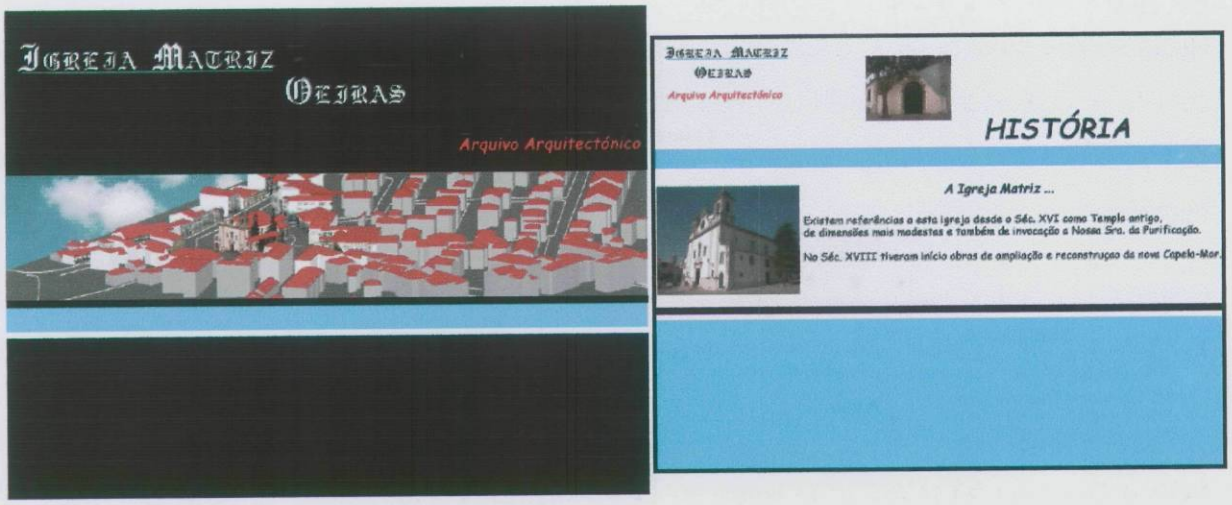


Figura 5.64 – Exemplo da interface geral da aplicação "Igreja Matriz de Oeiras – Arquivo arquitectónico".

O utilizador pode percorrer toda a aplicação através dos diferentes menus existentes, disponíveis a partir do menu principal. A figura 5.65 mostra o organigrama de "navegação". A secção de produtos resultantes contém uma base de dados com os alçados de cada fachada que será apresentada sempre que o utilizador o solicitar. A secção de pesquisa contém todos os textos, imagens, filmes, etc. que fazem parte desta aplicação.

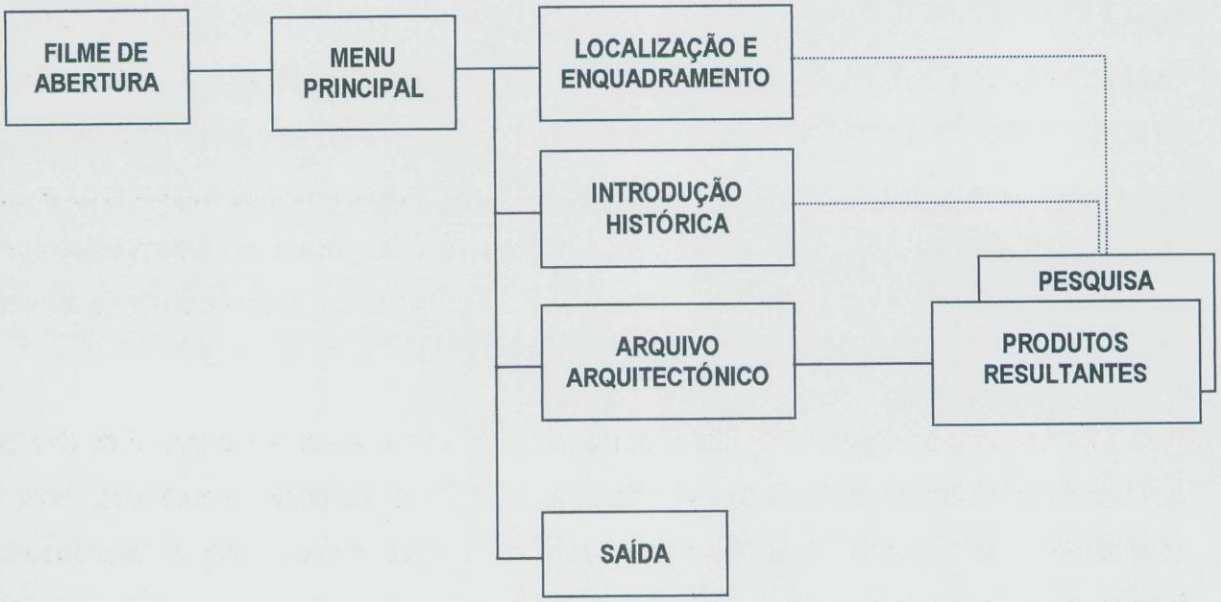


Figura 5.65 – Organigrama de "navegação".

A criação desta aplicação multimédia foi baseada na "Aplicação Registo Cabo Espichel" realizada por Ferreira *et al.* (2000).

5.8 ANÁLISE COMPARATIVA – FOTOGRAMETRIA ESTEREOSCÓPICA VERSUS MONÓSCÓPICA

Nesta secção procede-se à apresentação da análise em termos estatísticos dos resultados obtidos com os dois métodos fotogramétricos (estereoscópico e monoscópico) e as diversas câmaras, através de comparações com os respectivos valores obtidos por levantamento topográfico, com a finalidade de quantificar a qualidade dos referidos resultados.

Como já foi referido anteriormente (5.3.1) estes testes vão ser levados a cabo somente com dados da Igreja de Oeiras. Assim, dos 495 pontos de controlo levantados para a cobertura da mesma, procedeu-se a uma amostragem de cerca de 20% desses pontos (cerca de 100), escolhidos de modo aleatório.

Para a avaliação da precisão do desempenho de cada uma das câmaras utilizadas com os dois *softwares* foi calculado o Erro Médio Quadrático (EMQ), o desvio padrão e o máximo e mínimo dos resíduos (para X, Y e Z) encontrados para o respectivo conjunto de pontos amostrado.

Foi também analisada a relação entre os valores reais observados e os obtidos após a restituição através da análise de regressão linear e pela aplicação do teste t-*Student* para comparação de médias entre esses mesmos valores.

Espera-se que os resultados da análise estatística estejam dentro do esperado no que diz respeito aos valores aceitáveis para a criação de arquivos arquitectónicos – Tabela 2.2. Assim, o valor do EMQ e do desvio padrão calculados para os resíduos não deve ultrapassar os 5 cm. No que se refere à análise de regressão linear o coeficiente de explicação ou determinação (R-quadrado) obtido deve ser próximo de 1 uma vez que este mede o grau de ajuste da recta de regressão aos dados, indicando, como seria de esperar, que existe uma relação linear entre as coordenadas dos pontos observados e dos pontos medidos na restituição. Relativamente às médias dos dois conjuntos espera-se que sejam semelhantes (Guimarães e Cabral, 1997).

Para a comparação do desempenho global, em termos de precisão, aplicou-se o teste F de *Snedocor* que permite a análise comparativa da variância entre os resíduos dos pontos amostrados, desta vez considerando as câmaras duas a duas, dentro do método monoscópico e estereoscópico individualmente e depois entre eles.

Os resultados obtidos são apresentados nas secções seguintes.

5.8.1 *IMAGESTATION* SSK

Os valores das coordenadas dos pontos restituídos no SSK estão dependentes da precisão conseguida no processo de orientação das fotografias. No entanto, quando se pretende avaliar a precisão do *software*, as coordenadas consideradas são as obtidas na fase de restituição, depois de reamostradas as imagens e portanto, efectuadas todas as etapas de processamento. Neste trabalho, mediram-se os pontos considerados para a amostra e para as duas câmaras, a métrica digital e a métrica analógica. Pela análise dos resíduos, nomeadamente pela análise do EMQ e do desvio padrão (Tabela 5.9) verificou-se existir algum problema no que se referia à coordenada Z obtida quando se restituía os dados adquiridos pela câmara Rollei. Este facto leva a uma análise mais pormenorizada dos valores obtidos na fase de orientação das fotografias para garantir que tal acontecimento não era devido a erros cometidos durante esse processo. Esta análise permite concluir que os resultados das orientações e, para ambas as câmaras, são precisos e estão dentro dos limites impostos. O problema surge de facto após o processo de reamostragem. Dado o problema de aceitação, por parte do *software*, da distância focal da câmara, pensou-se que a obtenção destes resultados fosse derivada dele. Assim, fez-se ainda uma série de testes introduzindo a distância focal duplicada, tendo o cuidado de duplicar também o tamanho da imagem, do pixel e os valores de distorção das lentes. Apesar disto, os resultados obtidos foram semelhantes: os resultados do processo de orientação são bons, mas após a reamostragem o EMQ para a coordenada Z mantém-se elevado.

Tabela 5.9 – Resultados estatísticos do SSK referentes aos resíduos obtidos na restituição, i.e., depois da reamostragem.

	Rollei			Leica R5		
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
EMQ	2,15	1,61	9,55	2,3	2,43	4,0
Desvio Padrão	2,1	1,5	6,42	2,1	2,4	4,0
Máximo Resíduo	3,1	2,4	5,5	5,4	6,1	6,5
Mínimo Resíduo	-5,8	-5,4	-20,8	-5,6	-5,2	-5,7

A Figura 5.66 mostra os gráficos (EMQ e desvio padrão) elucidativos do problema, para comparar no caso da câmara Rollei, os resultados obtidos antes da reamostragem (Rollei-ABS) e após a reamostragem (Rollei-RES). Analogamente, apresentam-se os resultados para a câmara Leica, identificados como Leica-ABS e Leica-RES. Os gráficos mostram ainda os resultados obtidos para cada um dos eixos X, Y e Z.

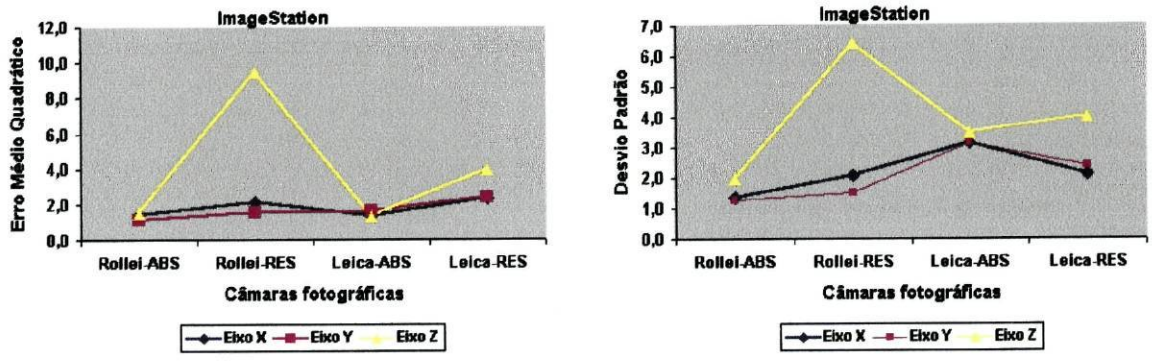


Figura 5.66 – Resultados estatísticos para análise das diferenças entre os resíduos obtidos antes (ABS) e após (RES) o processo de reamostragem, para as coordenadas (X, Y, Z).

A análise dos resultados evidencia, como já referido, um EMQ elevado para a câmara Rollei, na coordenada Z, que apenas se reflecte após o processo de reamostragem e apenas para esta câmara. Relativamente aos restantes eixos e às restantes situações o EMQ não ultrapassa os ± 5cm, o que está dentro das expectativas. O desvio padrão está também dentro dos requisitos do utilizador.

Com o intuito de verificar a corroboração desta análise procedeu-se a testes estatísticos mais significativos, como a regressão linear e também o teste t-*student* para avaliar os dados obtidos pela Rollei após a reamostragem. Relativamente à regressão linear pode ver-se pelos gráficos da Figura 5.67, que existe uma grande correlação entre os dados observados topograficamente e os dados medidos, para as coordenadas X e Y, o mesmo não se verificando para a coordenada Z. Na realidade, o coeficiente de explicação R-quadrado assume o valor 1 no caso dos eixos X e Y enquanto no caso do eixo Z é de apenas 0.5298, demonstrando que existe uma fraca correlação entre a maioria dos pontos considerados.

No que respeita à análise de regressão linear para os valores obtidos utilizando a câmara Leica após o processo de reamostragem, obtiveram-se coeficientes de determinação para X e Y iguais a 1 e para o eixo dos Z o valor 0.9889. Relativamente à relação entre os valores observados e obtidos antes da reamostragem o R-quadrado é sempre muito próximo de 1 para todos os eixos e para as duas câmaras.

A realização do teste t-*Student* corrobora mais uma vez a situação anormal que se manifesta com a câmara Rollei. Pela análise do resultado do teste t verifica-se que a hipótese das médias obtidas para as coordenadas X,Y observadas e as coordenadas X,Y medidas após a restituição serem iguais é aceite. No que refere à coordenada Z, o resultado do teste t mostra a rejeição da hipótese das médias (entre Z observado e Z medido) serem iguais.

A aplicação do teste t aos restantes conjuntos de dados (câmara Rollei antes da reamostragem e Leica R5 antes e após a reamostragem) aceita em todos os casos a hipótese da igualdade das médias.

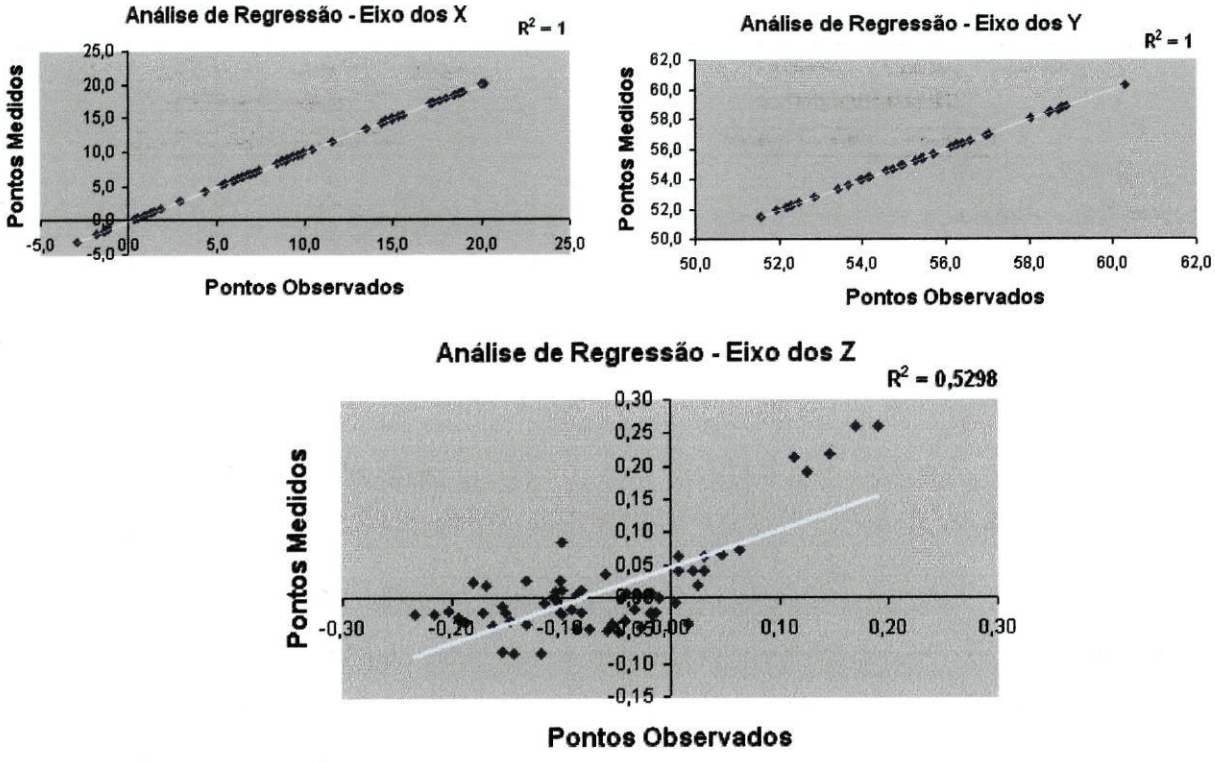


Figura 5.67 – Gráficos do resultado da análise da regressão para cada um dos eixos.

5.8.2 *PHOTOMODELER 4.0*

No *PhotoModeler* mediu-se também o conjunto de pontos que constituem a amostra, com o objectivo de comparar os resultados para cada uma das câmaras, para posteriores análises e conclusões sobre a melhor opção no que respeita à relação precisão – preço.

Na Tabela 5.10 apresentam-se os valores estatísticos encontrados para cada uma das câmaras utilizadas e na Figura 5.68 os respectivos gráficos referentes ao EMQ e ao Desvio Padrão.

Tabela 5.10 – Resultados estatísticos do *PhotoModeler* referentes aos resíduos obtidos.

	Rollei			Nikon			Leica R5			Leica R8		
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
EMQ	1,5	1,6	1,56	2,3	2,4	2,3	4,6	3,5	4,9	4,1	3,9	3,5
Desvio Padrão	1,5	1,6	1,5	2,3	2,4	2,3	4,1	3,5	4,9	3,9	3,8	3,4
Máximo Resíduo	3,1	2,9	3,5	4,3	4,1	4,0	8,9	8,3	8,8	7,1	7,7	7,5
Mínimo Resíduo	-3,6	-3,4	-2,5	4,2	-4,0	-3,9	-6,4	-7,1	-8,1	-7,8	-8,0	-8,4

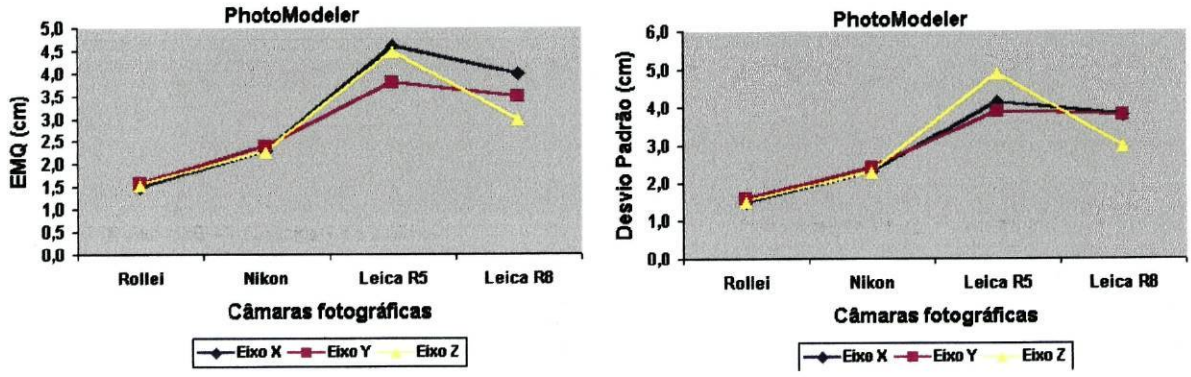


Figura 5.68 – Resultados estatísticos resultantes do processamento de dados no *PhotoModeler*, para cada uma das câmaras utilizada e para os eixos X, Y, e Z.

Pela análise dos gráficos verifica-se que a câmara Rollei é a que apresenta melhores resultados quando comparada com todas as restantes, embora os resultados relativos à Nikon sejam também satisfatórios. No que respeita às câmaras Leica R5 e Leica R8 observa-se um aumento nos EMQ e desvio padrão relativamente às anteriores. Este facto denota que as precisões são inferiores nas imagens obtidas com as câmaras analógicas, o que é devido ao processo de rasterização, uma vez que as distorções e perda de resolução provocadas pelo *scanner* têm que ser tomadas em consideração. De salientar que a câmara Leica R8, apesar de ter um pixel maior do que a Leica R5 apresenta valores melhores para o EMQ especialmente no que se refere à coordenada Z. Este facto reflecte a aquisição das fotografias que neste caso tinham os ângulos de convergência mais perto dos 90°. Não obstante as diferenças encontradas, os resultados são satisfatórios para todas as opções estudadas, mesmo para as que apresentam resoluções baixas. De referir que não se entrou em linha de conta com a precisão de medição do operador, pelo que os resultados podem ainda ser melhorados se forem efectuados por operadores experientes.

A análise de regressão linear e o teste t-*student* efectuado para estes conjuntos de dados, e comparados com os obtidos topograficamente, mostram que os resultados estão de acordo com o esperado: o coeficiente de correlação está próximo do valor 1 e o teste t-student aceita a igualdade das médias para todas as câmaras e todos os eixos.

5.8.3 ANÁLISE COMPARATIVA GLOBAL

A análise de resultados diz respeito à comparação da precisão dos resultados obtidos pelo método monoscópico e estereoscópico. Em adição, é também levada a cabo a comparação da precisão dos resultados obtidos por cada um dos métodos e diferentes câmaras, de acordo com o estipulado na Tabela 5.1.

A análise foi baseada em dois testes de hipóteses: o teste t-*Student*, que permite efectuar a comparação de médias entre dois conjuntos de dados amostrados; e o teste F de *Snedocor* (Reis *et al.*, 1999) que possibilita a comparação em termos de precisão pela análise da variância dos dados.

Com o teste t pode-se concluir se em termos médios os dois sistemas comparados produzem os mesmos resultados. Os dois testes são importantes uma vez que se complementam: os dois sistemas podem ser idênticos em termos médios mas um deles pode ter uma maior precisão. A Tabela 5.11 pretende sumariar os resultados obtidos para cada um dos conjuntos analisados para o teste t-*Student* e F de *Snedocor*, onde se apresentam os respectivos valores da média e variância, em micra, e também os resultados destes testes. Estes são traduzidos em termos de aceitável (A) (médias comparáveis) e de rejeitado (R) (médias não comparáveis). O nível de significância utilizado nos testes para a rejeição da hipótese nula foi tomado igual a 1%, por se considerar um valor razoável.

De salientar que neste estudo comparativo se eliminaram os resultados obtidos com a câmara digital métrica e o método estereoscópico, devido ao problema detectado, conforme explicado na secção 5.8.1, não se justificando a sua inclusão nos testes em questão.

Pela análise dos resultados dos testes efectuados para os valores das médias conclui-se que o desempenho médio das câmaras com o método monoscópico é o esperado. Assim, as câmaras Nikon e Rollei apresentam um desempenho similar e melhor do que o da Leica R5 e Leica R8. Estas últimas têm também um desempenho similar quer com o método estereoscópico quer com o método monoscópico.

Tabela 5.11 – Resultados do teste t e do teste F aplicado aos resíduos de cada par de câmara tendo em atenção o método monoscópico (M) e o método estereoscópico (E). Os valores para a média são apresentados em micra e para a variância em milímetros.

Câmaras Métodos	Nikon - M Rollei - M			Nikon - M Leica R8 - M			Nikon - M Leica R5 - M		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Média	966 -1818	-284 -4024	2671 -1830	966 -1454	-284 -12123	2671 -6210	966 16207	-284 4455	2671 13796
Resultado teste t	A	A	A	R	R	R	R	R	R
Variância	517 210	595 251	545 229	517 1334	595 1468	545 873	517 1615	595 1093	545 1986
Resultado teste f	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Câmaras Métodos	Leica R5 - M Leica R8 - M			Rollei - M Leica R8 - M			Rollei- M Leica R5 - M		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Média	16027 -14054	13796 -12123	4455 -6214	-1818 -14054	-4024 -12123	-1830 -6214	-1818 16027	-4024 13796	-1830 4455
Resultado teste t	R	R	R	R	R	A	R	R	R
Variância	1615 1334	1093 1468	1093 873	210 1334	251 1468	229 873	210 1615	251 1093	229 1986
Resultado teste f	A	A	A	R	R	A	R	R	R

Câmaras Métodos	Nikon - M Leica R5 – E			Leica R5 – M Leica R5 – E			Leica R8 - M Leica R5 – E		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Média	966 -9971	-284 -4044	2671 1606	16027 -9971	13796 -4044	4455 1606	-14054 -9971	-12123 -4044	-6214 1606
Resultado teste t	R	A	A	R	R	A	A	R	A
Variância	517 451	594 582	545 1622	1615 451	1092 582	1985 1622	1335 451	1468 582	873 1622
Resultado teste f	A	A	R	R	R	A	R	R	R

Câmaras Métodos	Rollei - M Leica R5 - E		
	X	Y	Z
Média	-1818 -9971	-4020 -4044	-1830 1606
Resultado teste t	R	A	A
Variância	210 450	251 582	229 1622
Resultado teste f	R	R	R

No que diz respeito à análise dos valores obtidos para a variância pode concluir-se que a Rollei, seguida da Nikon, é a câmara com a qual se obtêm resultados mais precisos quer sejam comparados com dados processados pelo método estereoscópico ou monoscópico. Relativamente à Leica R5 e R8 a precisão dos resultados obtidos pelo método monoscópico é comparável, se bem que na coordenada Z seja superior para a Leica R8. Tal facto pode ser explicado porque as fotografias foram adquiridas com ângulos de convergência maiores.

No entanto, a precisão dos dados obtidos com a câmara Leica R5 e processados pelo método estereoscópico não é comparável com a precisão dos dados obtidos com a câmara Leica R8 e processados pelo método monoscópico. Por conseguinte, a precisão em X e Y para a Leica R5 é maior do que a obtida para Leica R8, sendo que a precisão em Z é maior para a Leica R8, como seria de esperar pelo referido anteriormente.

Quanto à precisão dos resultados obtidos para a Leica R5 pelos métodos monoscópico e estereoscópico, a sua análise contraria o esperado. Assim, enquanto que a precisão relativamente às coordenadas X e Y é bastante superior às obtidas pelo método monoscópico, a precisão relativamente à coordenada Z é comparável.

Apesar da Rollei ser a câmara mais precisa, convém salientar que a precisão dos resultados obtidos com todas as outras estão dentro dos limites impostos para a criação do arquivo arquitectónico.

6

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A Fotogrametria ao longo da sua já longa evolução foi utilizando as novas tecnologias para apoiar o seu desenvolvimento, criando assim novas potencialidades e constantes desafios. Como foi anteriormente mencionado, existe o reconhecimento desta ciência como o método apropriado de apoio à preservação e restauração de monumentos e edifícios históricos. O desenvolvimento contínuo da técnica computacional contribuiu para a divulgação da Fotogrametria, associando-a a matérias de carácter menos exigente a nível geométrico e mais vocacionadas para áreas de visualização. No entanto, ambos os aspectos têm a beneficiar uma vez que enquanto uma apresentação mais interessante dos resultados fotogramétricos atrai potenciais utilizadores, o rigor que a Fotogrametria providencia valoriza qualquer representação que se pretenda realística.

Ao longo deste estudo foram-se apreendendo diversos conhecimentos sobre as matérias a considerar na implementação de um arquivo arquitectónico de edifícios históricos por meios fotogramétricos. Nesta área particular de aplicação da Fotogrametria, cada caso apresenta um novo desafio que tem que ser analisado e resolvido de forma diferente.

Os processos fotogramétricos empregues basearam-se em duas abordagens distintas: a Fotogrametria esteresocópica e a Fotogrametria convergente monoscópica, cujos princípios são descritos no capítulo 2 e que foram aplicadas utilizando os *softwares ImageStation* SSK e *PhotoModeler*, respectivamente. As duas metodologias apresentam vantagens e desvantagens que são de seguida abordadas.

A criação do arquivo arquitectónico pelo método convergente monoscópico tem algumas vantagens quando comparado com o método estereoscópico, nomeadamente no planeamento e aquisição das fotografias que é mais simples e versátil, dado que não são impostas condições tão restritivas como no "caso normal". Por essa razão é também mais fácil contornar obstáculos que obstruam as fachadas. Em adição, é mais prático pois em geral não é necessário recorrer a gruas ou equipamento especial para restituir a parte superior das fachadas, como o seria para o método estereoscópico que obriga à manutenção do paralelismo da base com a fachada. Neste caso particular, a aquisição das fotografias para o método estereoscópico tornou-se um processo mais moroso do que se previa ou seria

desejável, uma vez que, só após o processamento das imagens, foi possível constatar que o *software* reduzia automaticamente e drasticamente a área do modelo, fazendo com que o planeamento teórico das estações utilizadas não fosse o adequado e obrigando a nova aquisição de fotografias. Este facto levou também a um incremento no número de pares por fachada. Esta é uma das razões pela qual a maior parte dos testes efectuados foram baseados nos dados da Igreja de Oeiras, uma vez que a sua proximidade permitiu com mais facilidade a repetição da obtenção de fotografias, ao longo do trabalho.

No que respeita à extracção de informação ambos os métodos requerem mais ou menos as mesmas fases embora realizadas de maneiras diferentes, sendo um processo moroso em ambas as abordagens. O método monoscópico tem como desvantagem a dificuldade da extracção de informação de fachadas com pormenores complexos, como por exemplo os existentes na Igreja de Ponta Delgada. Na realidade, a restituição dos pormenores da parte superior da porta da fachada principal de Oeiras tornou-se bastante difícil. Tal facto é devido a não ser possível criar superfícies que formem planos que contenham a informação a restituir, o que obriga à marcação de todos os pontos em pelo menos três fotografias para obter as coordenadas 3D dos mesmos. Nestes casos este processo pode tornar-se muito moroso, podendo eventualmente não ser possível de realizar, implicando o recurso pontual à Fotogrametria estereoscópica. Nesta, a interpretação da informação torna-se mais efectiva uma vez que a visualização é feita a 3D facilitando a distinção dos pormenores existentes a diferentes planos.

Por conseguinte, pode concluir-se que no caso de objectos que contenham pormenores de características complexas é importante implementar um compromisso entre os dois métodos de extracção de informação, por forma a que se complementem, por exemplo: para os detalhes complexos utiliza-se o método estereoscópico enquanto que para o restante se pode recorrer ao método monoscópico. Este último tem ainda a vantagem de fornecer outro tipo de produtos finais, como por exemplo o modelo 3D renderizado com as fachadas rectificadas, que é conseguido de um modo bastante mais rápido que a restituição.

Relativamente aos testes comparativos sobre a precisão de cada câmara quando comparadas com as restantes, convém salientar que não se entrou em linha de conta com os resultados obtidos pelo método estereoscópico com a câmara Rollei, uma vez que a análise individual do seu desempenho em termos de precisão não foi satisfatório. Isto porque, apesar de as orientações das fotografias se terem efectuado normalmente, obtendo-se resíduos aceitáveis, a leitura directa e interactiva da coordenada terreno no modelo, relacionada com a distância do observador à fachada (coordenada Z), apresenta diferenças muito significativas, quando comparadas com as coordenadas topográficas. Uma análise

detalhada aos resíduos dos vários pontos de cada modelo leva à conclusão que para a parte central do modelo (na horizontal e na vertical) é possível extrair informação para fins de visualização (limites maiores de precisão). O problema poderá ter origem no facto da distância focal da Rollei não ser compatível com o *software* SSK. O problema foi comunicado aos fabricantes da câmara e do *software* para que se consiga alcançar uma solução. Entretanto as experiências efectuadas com a Leica R5, conforme pode ser visto na secção 5.8.1, não apresentaram este tipo de problemas.

No que diz respeito aos testes efectuados com o *PhotoModeler* e que incluiram as câmaras digitais e analógicas métricas e não métricas, verificou-se que, tal como seria de esperar, dado a dimensão do pixel, a Rollei apresenta o menor EMQ, seguida imediatamente pela Nikon. Entre as câmaras analógicas, e apesar das imagens obtidas pela Leica R8 apresentarem um tamanho de pixel maior do que a Leica R5, esta última tem um desempenho um pouco inferior. Este facto é justificado pela maneira como foram adquiridas as fotografias que, no caso da Leica R8, apresentam uma convergência de raios superior às da Leica R5. Este facto leva também a concluir que a aquisição das fotografias de forma a cumprir com a condição da convergência de raios é realmente importante e interfere na precisão final do trabalho. No caso da Leica R8 era superior a 80% em praticamente todos os pontos.

Os valores obtidos para a precisão estão dentro das tolerâncias exigidas para o arquivo arquitectónico, isto é, de 2 a 5 cm, para todas as câmaras. Estes valores podem eventualmente ser melhorados com operadores de maior experiência e com a utilização de pontos pré-sinalizados.

A análise comparativa em termos globais leva a concluir que a câmara Rollei é, de facto, a mais precisa de entre as câmaras utilizadas e tendo em consideração os diferentes métodos. Não foi possível verificar qual o método que apresentaria melhores resultados utilizando esta câmara, devido aos problemas anteriormente descritos. A Nikon é a segunda câmara mais precisa quer se processem os dados pelo método estereoscópico ou monoscópico. Relativamente às câmaras Leica R5 e Leica R8 a primeira apresenta, de um modo geral, um desempenho relativamente superior. Neste contexto pode concluir-se que tendo em atenção a relação qualidade-preço, a escolha da câmara Nikon e do método monoscópico é, sem dúvida, uma boa opção, para situações que não apresentem pormenores muito complexos do ponto de vista arquitectónico.

Seria interessante conseguir rasterizar os negativos obtidos com as câmaras Leica R5 e Leica R8 num *scanner* fotogramétrico onde se pode obter um pixel de 7,5 μm e onde as distorções são conhecidas, para verificar, de forma mais correcta, o desempenho destas duas câmaras. Outro aspecto importante seria efectuar a calibração do *scanner* utilizado neste estudo para fazer o mesmo tipo de análise.

Relativamente ao modelo tridimensional urbano pode concluir-se que a sua criação, por processos manuais, é um trabalho bastante moroso. Este facto pode ser colmatado, na parte da modelação e mapeamento de texturas, pela automatização de algumas tarefas com o recurso a programação. Neste caso particular do *Microstation* só recentemente se tornou compatível com linguagens de programação conhecidas. No que diz respeito à criação da textura real, um dos aspectos importantes a ter em atenção é a aquisição das fotografias, de tal modo que as várias fotografias que compõem a fachada tenham pormenores comuns e bem identificáveis para se proceder ao mosaico das mesmas.

A junção do arquivo arquitectónico com o modelo tridimensional urbano num CD multimédia que coloque em evidência os aspectos geométricos e visuais dos mesmos é sem dúvida uma mais valia. A divulgação do património cultural através das técnicas multimédia é uma forma atractiva de apresentar projectos de interesse arquitectónico, nomeadamente como meio de sensibilização no âmbito da preservação do património. Para além disso, o acesso à informação torna-se mais acessível e estruturado.

APÊNDICES

APÊNDICE A

FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRIA

A teoria sobre Fotogrametria pressupõe o conhecimento de variadas matérias não específicas apenas desta área, como por exemplo a estatística e a álgebra. Métodos matemáticos fundamentais utilizados incluem transformação de coordenadas, quer no plano (2D) quer no espaço (3D) e o método dos mínimos quadrados[1]. A teoria aqui descrita, diz somente respeito à especificidade da área, focando os aspectos mais relevantes para a compreensão do tema, como seja a projecção central, as relações geométricas entre duas câmaras e um objecto e, várias câmaras e o objecto, de modo a transformar medições nas imagens em informação espacial sobre o objecto.

A-1 PROJECÇÃO PERSPECTIVA

A Figura A.1 mostra características importantes presentes numa única fotografia, ponto de partida para a construção de um modelo funcional para a Fotogrametria, baseado portanto na projecção central. O centro de perspectiva (O) é um ponto que representa geometricamente a posição das lentes da câmara utilizada para adquirir a fotografia. O ponto principal (P) é definido pela intersecção do eixo de perspectiva (POp) com o plano de projecção (a fotografia), tendo em atenção que o eixo de perspectiva é normal à fotografia e passa pelo centro de perspectiva. A distância ao longo desta linha, desde o centro de perspectiva até à fotografia é chamada distância principal (c).

O objecto fotografado e a sua projecção na fotografia têm de estar relacionados por forma a que seja, possível tirar informação fidedigna sobre o referido objecto através da fotografia. Para o estabelecimento dessa relação utilizam-se dois sistemas de coordenadas tridimensionais: o sistema de coordenadas da câmara (sistema secundário), que tem origem no centro de perspectiva, e o sistema de coordenadas do objecto (sistema primário) que pode ser local (relativo ou arbitrário) ou nacional (ligado à Rede Geodésica Nacional). O sistema de coordenadas câmara tem o plano **xy** paralelo à fotografia (plano de projecção) e o eixo dos **z** é perpendicular a esse plano, de tal forma que as coordenadas do ponto principal serão (0,0,0), assumindo que não existem desvios entre o ponto principal e o centro fiducial. As coordenadas de qualquer ponto na fotografia serão (x_a, y_a, -c).

[1] Pode encontrar-se literatura sobre estas matérias, por exemplo, em Slama (1980), Wolf (1983), Kraus (1993) e Cooper (1996).

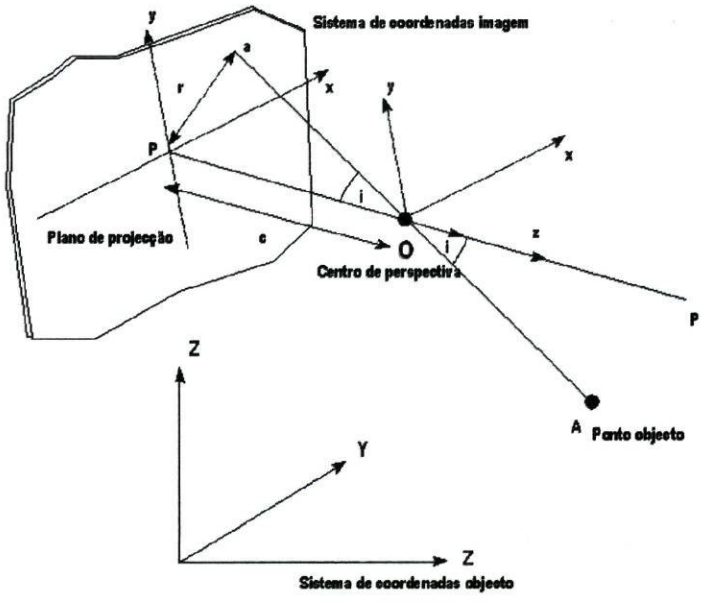
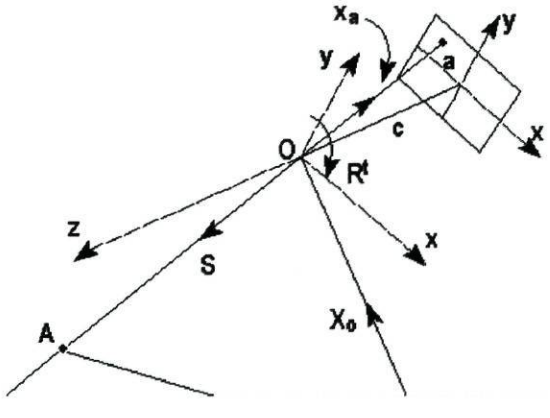


Figura A.1 – Projecção perspectiva (Adaptada de Cooper, 1996).

Os dois sistemas de coordenadas podem ser relacionados usando o conceito de colinearidade, uma expressão matemática que estabelece a condição de que um ponto no objecto (A), o centro de perspectiva (O) e o respectivo ponto projectado na fotografia (a) estão, idealmente, numa mesma linha recta, conforme mostra a Figura A.2. Tendo então em conta a existência do sistema de coordenadas primário e secundário atrás descritos, podemos definir as coordenadas do centro de perspectiva no sistema primário (X,Y,Z) como (X_O, Y_O, Z_O).



As coordenadas de um ponto A nesse mesmo sistema são (X_A, Y_A, Z_A). Escrevendo os vectores no sistema de coordenadas primário (espaço objecto), tem-se a seguinte relação: $\mathbf{X}_A = \mathbf{X}_O + \mathbf{S}$, onde **S** é o vector posição de A relativamente a O, que é colinear com $\mathbf{x}_a$ e de sinal contrário, quando considerado o plano positivo. Assim, tendo em conta a relação angular entre os dois sistemas de coordenadas descrita por uma matriz ortogonal 3×3 - **R**, cujos elementos são os cosenos dos ângulos ω, φ, κ entre cada par de eixos coordenados, pode escrever-se,

$$\mathbf{X}_A = \mathbf{X}_O - \mu \mathbf{R}^t \mathbf{x}_a \quad ; \quad \mu > 0 \tag{A.1a}$$

Que, em forma matricial vem

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix} - \mu \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ c \end{bmatrix} \tag{A.1b}$$

Pela análise das equações (A.1a) ou (A.1b) pode concluir-se que, conhecendo a posição do centro de perspectiva, a direcção do eixo de perspectiva e a distância principal, não existe uma única solução para as coordenadas (X_A, Y_A, Z_A) do ponto **A**, dadas as coordenadas câmara da sua projecção **a**; a direcção de A relativamente ao centro de perspectiva é conhecida, mas não é possível determinar unicamente o parâmetro μ sem informação adicional, como por exemplo, a distância de O a A.

A transformação inversa (sistema primário no secundário) é

$$\mathbf{x}_a = \mu^{-1} \mathbf{R} (\mathbf{X}_O - \mathbf{X}_A) \tag{A.2a}$$

que, em notação matricial, vem

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ c \end{bmatrix} = \mu^{-1} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_O - X_A \\ Y_O - Y_A \\ Z_O - Z_A \end{bmatrix} \tag{A.2b}$$

Obtêm-se, assim, três equações que descrevem a condição da colinearidade. A terceira equação de (A.2b) pode ser escrita explicitamente a partir do factor de escala μ, podendo eliminar-se substituindo essa expressão nas duas primeiras equações de (A.2b). Obtém-se, deste modo, as chamadas equações de colinearidade (A.3a) e (A.3b)):

$$x_a = -c\frac{[r_{11}(X_A - X_O) + r_{12}(Y_A - Y_O) + r_{13}(Z_A - Z_O)]}{[r_{31}(X_A - X_O) + r_{32}(Y_A - Y_O) + r_{33}(Z_A - Z_O)]} \quad \text{(A.3a)}$$

$$y_a = -c\frac{[r_{21}(X_A - X_O) + r_{22}(Y_A - Y_O) + r_{23}(Z_A - Z_O)]}{[r_{31}(X_A - X_O) + r_{32}(Y_A - Y_O) + r_{33}(Z_A - Z_O)]} \quad \text{(A.3b)}$$

As equações de colinearidade têm de ser linearizadas para puderem ser solucionadas pelo método dos mínimos quadrados. Na sua forma mais genérica, elas contêm como parâmetros as coordenadas dos pontos do espaço objecto, as coordenadas no espaço objecto da orientação da câmara aquando a aquisição da fotografia e ainda, a orientação interna da câmara (coordenadas fotográficas do ponto principal e distância principal); Como observações utilizam as coordenadas câmara e espaço objecto de pontos homólogos. Estas equações são a base para o ajustamento por feixes, tal como é aplicado em Fotogrametria terrestre (Mikhail *et al.*, 2001). Constituem ainda a base da resolução de problemas de intersecção e resecção espacial. São também utilizadas na orientação relativa (A-3), sendo portanto consideradas uma base fundamental da Fotogrametria analítica terrestre e aérea.

A-2 ORIENTAÇÃO INTERNA

Orientação interna é o termo utilizado pelos fotogrametristas para descrever a geometria interna do sistema composto pela câmara e lentes. O feixe de luz que vem do objecto e atravessa a lente até ao dispositivo de formação da imagem, quer seja película (caso das câmaras analógicas) ou CCD (caso das câmaras digitais) tem de ser compensado dos fenómenos físicos que afectam essa passagem. A configuração geométrica desta passagem dos feixes de luz, que pode ser descrita matematicamente, é a realidade física a que se refere a orientação interna (Fryer, 1989 e 1996). Os parâmetros que são usualmente determinados com a calibração são: a distância principal, as coordenadas fotográficas do ponto principal e os parâmetros de distorção (radial e tangencial) das lentes. Estes parâmetros são determinados durante a calibração da câmara e fornecidos pelo fabricante através do respectivo relatório de calibração.

A solução de problemas fotogramétricos envolve normalmente algum tipo de medição na imagem. No caso da orientação interna efectuam-se medições das coordenadas das marcas fiduciais. A forma como esta orientação é efectuada tem vindo a ser modificada pelo evoluir da Fotogrametria. Em Fotogrametria analítica e digital a orientação interna baseia-se na determinação dos parâmetros de transformação entre o sistema de referência das fotografias (dado pelo relatório de calibração através das marcas fiduciais) e o sistema do aparelho fotogramétrico. Utiliza-se geralmente a transformação bidimensional afim ou conforme entre os dois sistemas.

A orientação interna digital tem a vantagem de permitir a utilização de processos automáticos de leitura de marcas fiduciais, através de técnicas de *template matching*. Quando a imagem é adquirida directamente por uma câmara digital não é necessário proceder à orientação interna, uma vez que a imagem digital é uma matriz de pixel com geometria rígida e bem definida.

Segue-se uma breve descrição dos parâmetros necessários à orientação interna.

a. Distância principal

Relativamente à distância principal convém apenas referir que, muitas vezes, é entendida como sinónimo da distância focal, o que não é estritamente correcto, uma vez que o termo distância focal se refere à distância principal para focagens no infinito, isto é, a distância do objecto a fotografar à câmara é muito maior que a distância principal (Fryer, 1989). Na Fotogrametria terrestre raramente se usa câmaras com focagens no infinito, dado que o valor da distância câmara-objecto não é suficientemente grande quando comparado com o valor da distância principal, podendo-se eventualmente recorrer a diferentes focagens e portanto a diferentes distâncias principais. Normalmente, a configuração geométrica da rede fotogramétrica (A.7) e os algoritmos utilizados pelos softwares facilmente determinam o valor da distância principal, sendo necessário apenas o conhecimento de um valor aproximado. O valor final é depois determinado pelo modelo utilizado para determinar a relação entre as coordenadas da fotografia/imagem e as do objecto (Fryer, 1996).

b. Ponto principal

O ponto principal é, por definição, a projecção do centro de perspectiva no plano onde a imagem se forma, se o eixo óptico coincidir com a linha de projecção. Assim, o ponto principal coincide com o centro fiducial. Normalmente tal não acontece sendo necessário encontrar o valor dos desvios em x e y, entre o ponto principal e o centro fiducial. Este termo deixa de fazer sentido quando se está a utilizar as câmaras digitais dado que não existem marcas fiduciais nas imagens, sendo possível, no entanto, determinar o seu centro. Esta relação entre os dois pontos mantém-se, normalmente, constante, com excepção para as câmaras não-métricas que possibilitam a mudança de focagens na aquisição de várias fotografias. As câmaras métricas não possuem, normalmente, um sistema de focagem como acontece com as câmaras não-métricas, que, apesar de poder representar uma mais valia (especialmente para a área de *computer vision*), tem algumas desvantagens. Por exemplo, cada vez que se faz uso do sistema de focagem existe um movimento dos elementos da lente relativamente ao resto do sistema que vai introduzir mudanças na geometria interna da câmara – a localização do ponto principal varia assim como variam as distorções na imagem causadas pelas lentes. Como forma de resolução deste problema, recomenda-se que seja levada a cabo uma calibração da câmara para as

várias focagens a serem utilizadas por forma a garantir o conhecimento da sua geometria nas várias situações.

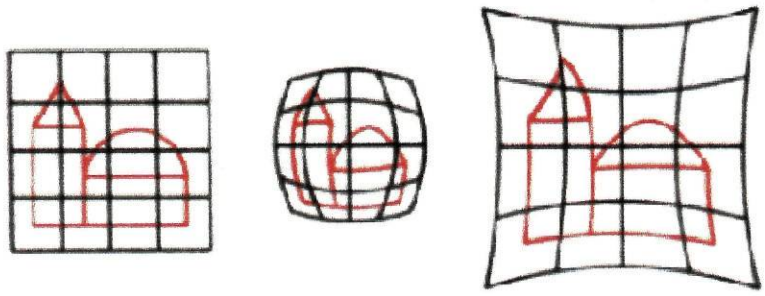
c. Distorção das lentes

Pode definir-se distorção das lentes como sendo a falta de colinearidade entre o ponto imagem e o ponto objecto: a imagem do ponto sofre um desvio relativamente à sua posição correcta, ou seja, à posição que teria se fosse obtido com uma câmara ideal e perfeita. A distorção é devida a dois factores, por um lado, o conceito básico inerente à geometria de aquisição de imagem – a imagem perfeita só pode ser obtida para um único ponto objecto e para um único ponto imagem e por isso não podem ser concebidas lentes que tenham uma geometria de imagem perfeita em todas as direcções do campo de visão; por outro lado, a existência de erros na construção das lentes – imperfeições no polimento das lentes ou na sua montagem levam a erros na geometria da imagem. Para simplificar a análise sobre lentes assume-se que o comportamento delas é perfeito e que foram devidamente construídas, pelo que os desvios relativamente a essas condições são tratados como distorções a serem corrigidas para se obter uma imagem com geometria correcta (Mcglone, 1989).

A distorção das lentes é dividida normalmente em duas componentes, radial e tangencial. A distorção radial afecta a posição dos pontos imagem, numa linha recta, radialmente a partir do ponto principal. É também conhecida como distorção simétrica uma vez que é função apenas da distância radial, ou seja, dois pontos simétricos relativamente ao ponto principal terão a mesma distorção radial. A distorção tangencial é causada pelas imperfeições de construção (falta de alinhamento dos componentes da lente) e tem componentes tangencial e radial assimétricas. Esta distorção num ponto ocorre numa direcção perpendicular à linha radial que vai desde o ponto imagem até ao ponto principal.

- **Distorção radial**

Se a imagem de um dado objecto é deslocada radialmente quer para mais perto ou para mais longe do ponto principal, diz-se que foi distorcido radialmente. A Figura A.3 mostra as duas hipóteses de distorção existentes – imagem distorcida mais perto do ponto principal, ou seja a imagem aumenta em direcção ao centro, tem-se a chamada distorção *barrel* (Figura A.3b) e mais afastada do ponto principal ou seja contrai-se em direcção ao centro, tem-se a chamada distorção *pincushion* (Figura A.3c).



a) b) c)

Figura A.3 – Efeitos da distorção radial na imagem: a) imagem geometricamente correcta, b) imagem distorcida com as maiores distorções perto do ponto principal, c) imagem distorcida com as maiores distorções afastadas do ponto principal.

A distorção radial das lentes, δ_r, é normalmente expressa como uma função polinomial da distância radial, **r**, relativamente ao ponto principal, como mostra a equação (A.4):

$$\delta_r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \ldots \qquad (A.4)$$

onde K_1, K_2 e K_3 são os coeficientes polinomiais da distorção radial determinados pela calibração. Normalmente a unidade da distorção vem em micrómetros e a distância, r, é dada pela equação (A.5):

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \qquad (A.5)$$

com r, x, x_p, y e y_p em milímetros, sendo (x,y) as coordenadas fotográficas do ponto imagem e (x_0,y_0) as coordenadas fotográficas do ponto principal.

A distorção δ_r é normalmente calculada em duas componentes, segundo x e y:

$$\delta_{r\,x} = \delta_r\ (x-x_0)/\ r \qquad (A.6a)$$

$$\delta_{r\,y} = \delta_r\ (y-y_0)/\ r \qquad (A.6b)$$

Para a maior parte das lentes são suficientes dois ou três coeficientes polinomiais para descrever completamente o efeito de distorção. Termos superiores à quinta ordem podem sempre ser ignorados dado que, na prática, a sua contribuição para a deformação é desprezível. Em qualquer aplicação fotogramétrica que exija algum grau de precisão tem de se entrar com esta correcção uma vez que a distorção pode atingir valores da ordem dos 300μm nos cantos da imagem (Fryer, 1996).

- **Distorção tangencial**

Todos os elementos constituintes de um sistema de lentes deveriam estar alinhados na altura da sua construção, de forma a serem ortogonais com o eixo óptico de todo o sistema. Qualquer desvio vertical ou rotação de um elemento das lentes do seu perfeito alinhamento causará um erro na geometria da imagem conhecido por distorção tangencial.

A distorção tangencial é descrita por dois polinómios, um para o desvio na direcção do eixo dos x, δ_x, e outro para o desvio segundo o eixo dos y, δ_y, dados pelas equações (A.7a) e (A.7b):

$$\delta_x = P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_2 (x - x_0) (y - y_0) \quad \text{(A.7a)}$$

$$\delta_y = P_2[r^2 + 2(y - y_0)^2] + 2P_1 (x - x_0) (y - y_0) \quad \text{(A.7b)}$$

onde P1 e P2 são os coeficientes a serem encontrados. Os outros termos são os mesmos que das equações (A.6a) e (A.6b).

O valor da distorção tangencial é normalmente inferior ao da distorção radial, sendo de cerca de 30 μm nos cantos da imagem. No meio da imagem será menor ou igual a um quarto deste valor. À excepção de grandes escalas, por exemplo, superiores ou iguais a 1:30, esta distorção poderá ser desprezada (Fryer, 1989).

A-3 ORIENTAÇÃO RELATIVA

Uma vez estabelecida a orientação interna de cada fotografia/imagem do par estereoscópico pode-se efectuar a orientação relativa, com o objectivo de posicionar as fotografias em posição análoga àquela em que foram obtidas relativamente umas às outras. Existem vários métodos para calcular os parâmetros de orientação que relacionam o sistema de coordenadas imagem de duas fotografias que formam o modelo estereoscópico. A determinação dos parâmetros de transformação para efectuar a orientação relativa é feita, geralmente, recorrendo às equações de coplanaridade, pelo que se apresenta uma breve descrição.

A condição de coplanaridade implica que os dois centros de perspectiva, o ponto objecto e os pontos imagem correspondentes nas duas fotografias se encontrem todos num plano. A Figura A.4 mostra a coplanaridade entre os vários elementos referidos.

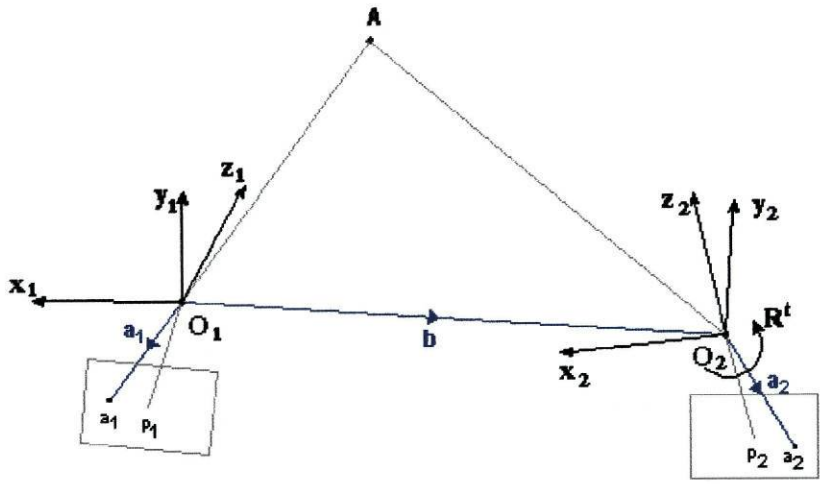


Figura A.4 – Coplanaridade (Cooper, 1996)

A equação é expressa em termos do vector entre os dois centros de perspectiva, a base (b), e o vector do ponto em cada fotografia. Considere-se que o sistema de coordenadas (x_1, y_1, z_1) da Figura A.4, com origem no centro de perspectiva O_1 é o sistema de coordenadas primário. Além disso, é necessário estimar os elementos de orientação externa de uma segunda câmara cujo centro de perspectiva é em O_2. O alvo (objecto) A é projectado em a_1 e em a_2. Os vectores $\mathbf{a_1}$, $\mathbf{a_2}$ e $\mathbf{b}$ são coplanares e estão situados no plano epipolar de A e dos dois centros de perspectiva. Relativamente ao sistema primário, estes vectores podem ser escritos da seguinte forma (A.8):

$$\mathbf{a_1} = -\lambda[x_1 \; y_1 - c_1]^t; \qquad \mathbf{a_2} = -\mu \, \mathbf{R}^t [x_2 \; y_2 - c_2]^t; \qquad \mathbf{b} = [b_x \; b_y \; b_z]^t \tag{A.8}$$

onde $\mathbf{b}$ é a base fotográfica e $\mathbf{R}^t$ é a matriz de rotação para a transformação de coordenadas entre os dois sistemas. Uma vez que os três vectores são coplanares, o volume do paralelepípedo por eles formado tem de ser zero. Assim, o produto triplo escalar é zero: $\mathbf{b}.\mathbf{a_1} \times \mathbf{a_2} = 0$ ou, na forma de determinante (A.9):

$$\begin{bmatrix} b_x & x_1 & r_{11}x_2 + r_{21}y_2 - r_{31}c_2 \\ b_y & y_1 & r_{12}x_2 + r_{22}y_2 - r_{32}c_2 \\ b_z & -c_1 & r_{13}x_2 + r_{23}y_2 - r_{33}c_2 \end{bmatrix} = 0 \tag{A.9}$$

Esta equação é a equação de coplanaridade e contém 12 incógnitas, 6 parâmetros da orientação externa de cada uma das fotografias, assumindo que os parâmetros de orientação interna (coordenadas do ponto principal e distância principal) são conhecidos. No entanto, na orientação relativa, apenas é necessário obter a solução de cinco parâmetros, uma vez que são dados valores arbitrários às incógnitas de uma das fotografias e a um parâmetro de posição da outra. Deste modo, a orientação relativa envolve a determinação de cinco parâmetros: ou as coordenadas do centro de

perspectiva (Y_O, Z_O) e os três ângulos de orientação (ω, φ, κ) da segunda fotografia, ou os dois ângulos (φ, κ) da fotografia da esquerda e os ângulos (ω, φ, κ) da fotografia da direita. Para a determinação destas incógnitas pode medir-se as coordenadas fotográficas de pelo menos 5 pares de pontos, bem distribuídos pelo espaço objecto, uma vez que cada par fornece uma equação de coplanaridade, sendo então necessário cinco pares de raios para se obter cinco equações, que é o mínimo requerido. Para que seja possível fazer a estimação dos parâmetros pelo método dos mínimos quadrados, não se pode considerar apenas o mínimo requerido e como tal, tem de se medir mais coordenadas fotográficas. A equação (A.9) tem de ser linearizada para poder entrar numa solução desse tipo. Detalhes sobre métodos de linearização de equações e método dos mínimos quadrados podem ser encontrados em *Manual of Photogrammetry*, capítulo 2 (Slama, 1980).

Na prática, para que um número suficiente de pares de raios correspondentes da imagem esquerda e direita se intersectem, medem-se seis pontos bem distribuídos no modelo, se possível localizados nas posições denominadas *Von Gruber* (Figura A.5). Este processo cria um modelo tridimensional da área de sobreposição das duas fotografias, num sistema de coordenadas modelo arbitrário.

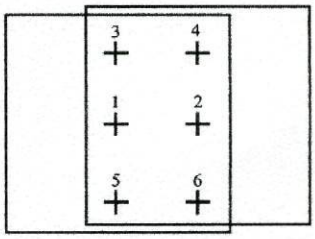


Figura A.5 – Posições de *Von Gruber*.

A orientação relativa na Fotogrametria digital está também facilitada por algum automatismo existente nas estações fotogramétricas digitais: o cursor é conduzido para as posições de *Von Gruber*, onde o operador selecciona um ponto apropriado. Esse ponto é medido numa das imagens pelo operador e o seu correspondente é automaticamente encontrado na outra imagem por método de *image matching* (Gomes Pereira, 1996). O operador poderá intervir no caso das medições automáticas serem consideradas insatisfatórias.

A-4 ORIENTAÇÃO ABSOLUTA

A orientação absoluta conclui o processo que relaciona as coordenadas imagem com as coordenadas terreno. O modelo criado como resultado da orientação interna e relativa tem uma forma análoga ao terreno que representa. No entanto, a sua escala e posição têm de ser ajustadas relativamente a esse mesmo terreno. Este processo está dependente dos pontos de controlo referidos anteriormente. As coordenadas terreno de um dado ponto são relacionadas com as suas coordenadas modelo através de uma transformação conforme tridimensional com sete parâmetros: três translações (em X, Y e Z), três rotações em torno dos três eixos e um factor escala. Assim, como são 7 as incógnitas a serem determinadas são necessários, no mínimo, dois pontos de controlo completos (coordenadas X, Y, Z

conhecidas) e um ponto de controlo altimétrico (coordenada Z conhecida). No entanto, é recomendável que um número superior de pontos de controlo seja disponibilizado, quer para verificação, quer para que se possa obter uma solução pelo método dos mínimos quadrados. Para que os parâmetros sejam determinados com precisão os pontos têm de estar bem distribuídos pelo modelo. Após esta orientação, as coordenadas modelo podem ser convertidas em coordenadas terreno.

A-5 TRIANGULAÇÃO AÉREA

A triangulação aérea surge para minimizar o trabalho de campo na obtenção de coordenadas de pontos de controlo, sendo um factor fundamental para a praticabilidade e economia do projecto fotogramétrico. Sem a triangulação aérea era compulsório proceder à aquisição de no mínimo dois pontos de controlo com coordenadas planimétricas e altimétricas e um ponto de controlo com informação altimétrica por cada par estereoscópico.

Além da vantagem económica, a triangulação aérea trás outros benefícios: a) evita atrasos e incómodos relacionados com as condições atmosféricas adversas; b) minimiza as dificuldades de deslocações a áreas de difícil acesso; c) além de poder permitir a verificação da precisão dos pontos de controlo durante o processo de cálculo (Wolf, 1983).

A triangulação aérea pode ser classificada, de acordo com o elemento unidade do ajustamento, em triangulação por feixes (fotografia), modelos e fiadas (este último já não é mais utilizado). A triangulação por ajustamento simultâneo do bloco de feixes é o mais preciso se bem que o mais exigente em termos computacionais. No entanto, com a evolução dos processadores, ele é o método utilizado hoje em dia. Assim, somente este método é aqui considerado. Os procedimentos para o efectuar incluem:

1) Ligação das fotografias adjacentes na mesma fiada e em fiadas contíguas, e

2) Ajustamento do bloco às coordenadas do sistema de referência terrestre.

Na Figura A.6 mostra-se esquematicamente a posição dos pontos de ligação - pontos de ligação entre fotografias da mesma fiada: *pass points* e pontos de ligação entre fotografias de fiadas consecutivas: *tie points*. Estes pontos encontram-se em posições análogas às posições de *Von Gruber*, sendo a sua medição que permite a orientação das diversas fotografias no sistema de coordenadas terreno.

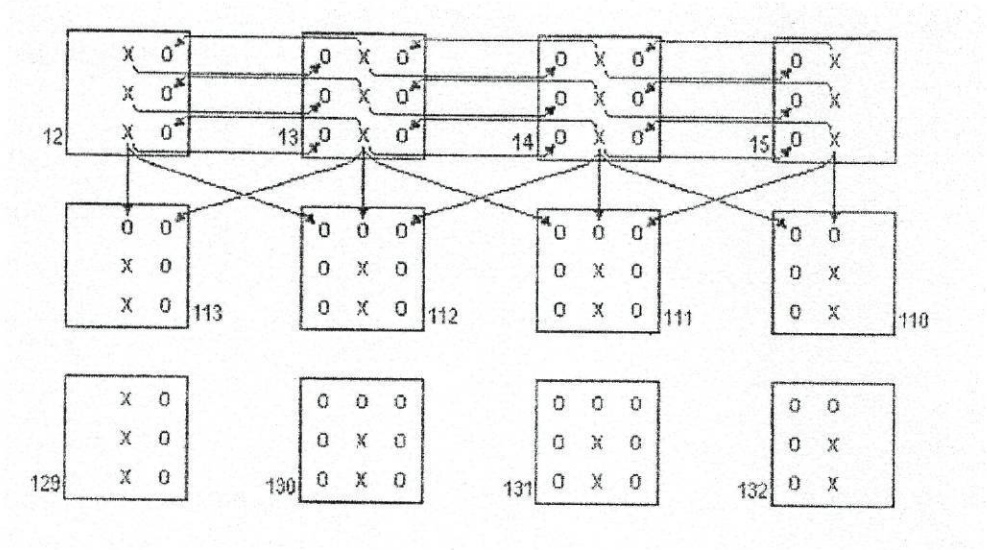


Figura A.6 – Esquema da posição dos pontos de ligação entre fotografias e fiadas.

Os pontos de controlo podem ser agora medidos, sendo um processo mais rápido, dado o seu número ser inferior ao que seria na orientação absoluta de modelos individuais. Por intermédio de algoritmos de ajuste são calculadas as coordenadas terreno para todos os pontos de ligação, bem como os parâmetros de orientação externa de cada fotografia. Com estes últimos o *software* calcula os parâmetros das orientações relativa e absoluta.

A-6 GEOMETRIA CONVERGENTE MONOSCÓPICA MULTI-IMAGEM

A reconstituição tridimensional de um objecto utilizando a geometria convergente multi-imagem pressupõe a aquisição de fotografias do objecto a partir de várias estações colocadas à volta do mesmo, com o cuidado de que os raios de luz sejam convergentes em cada ponto. A câmara vai sendo, portanto, posicionada em sítios de forma a que os ângulos dos eixos ópticos convirjam em direcção ao objecto em causa.

Este método é baseado na suposição de que se um ponto é visível em duas ou mais fotografias, pode ser calculada a sua posição tridimensional, se forem conhecidas à partida a posição e orientação da câmara (Wolf, 1983) e tal como o caso normal, tornava-se bastante dispendioso, uma vez que exigia que as câmaras estivessem montadas em teodolitos para que houvesse controlo da sua posição e orientação. Com o desenvolvimento da Fotogrametria analítica e digital, os algoritmos desenvolvidos permitiam superar este problema pelo chamado ajustamento por feixes, onde não é necessário conhecer, à priori, a posição e orientação da câmara aquando da aquisição das fotografias. Na verdade, as posições da câmara podem ser livres, dispensando mesmo o uso de tripés, de tal forma que a orientação externa dos raios de luz é desconhecida. Os raios de luz de cada fotografia são

individualmente ligados pela medição de pontos comuns, pelo que cada ponto deve aparecer em pelo menos duas fotografias, em três será o ideal para verificação. Além disso, os raios não devem intersectar-se em ângulos muito agudos (Kraus, 1993).

Na concepção de uma rede fotogramétrica multiestação é necessário efectuar várias perguntas: Qual é a escala óptima para a fotografia? Quantas estações serão necessárias e qual a geometria de imagem que melhor resultados dará em termos de exactidão das posições requeridas? Quantas fotografias devem ser tiradas por estação? Será que a escolha da escala e geometria de imagem permitem uma adequada profundidade de campo suficiente para uma boa focagem? Que pontos, naturais ou artificiais, são visíveis de cada fotografia? Haverá certas zonas no alvo onde a precisão da triangulação será fraca devido, quer à configuração da rede fotogramétrica quer a outros factores, como por exemplo, não visibilidade de pontos suficientes, devido ao facto da imagem estar pouco contrastada As respostas a estas questões não são sempre lineares, mas têm de ser respondidas quando se quer obter uma rede fotogramétrica de feixes, no mínimo, satisfatória (Fraser, 1989).

Na Figura A.7 podem ver-se cinco câmaras dispostas à volta de um objecto com um determinado alvo, designado por A_i, que depois de fotografado nas várias posições da câmara, dará origem a um ponto a_{ij} na imagem/fotografia da câmara j. Não é estritamente necessário que cada alvo A_i seja fotografado em cada uma das câmaras, sendo no entanto conveniente que seja pelo menos por duas câmaras que garantam um ângulo paraláctico grave (uma boa convergência de raios). Para a resolução deste método são usadas também as equações de colinearidade (A.3a e A.3b)

Normalmente, existem vários parâmetros adicionais a serem incluídos, por exemplo, um conjunto típico de parâmetros caso se esteja a usar uma câmara não calibrada, j, são: dois elementos de orientação interna (x_{0j}, y_{0j}), três coeficientes do polinómio que modela a distorção geométrica radial das lentes (K_{1j}, K_{2j} e K_{3j}) e dois coeficientes do polinómio que modelam os efeitos geométricos da distorção tangencial (P_{1j} e P_{2j}). Deste modo, o lado esquerdo das equações de colinearidade A.3a e A.3b serão escritas da seguinte forma:

$$x_{ij} - x_{oj} + (x_{ij} - x_{oj})\, r_{ij}^{-1} (K_{1j} r_{ij}^3 + K_{2j} r_{ij}^5 + K_{3j} r_{ij}^7) + P_{1j}[r_{ij}^2 + 2(x_{ij} - x_{oj})^2] + 2P_{2j} (x_{ij} - x_{oj}) (y_{ij} - y_{oj}) \qquad \text{(A.10a)}$$

e

$$y_{ij} - y_{oj} + (y_{ij} - y_{oj})\, r_{ij}^{-1} (K_{1j} r_{ij}^3 + K_{2j} r_{ij}^5 + K_{3j} r_{ij}^7) + P_{1j}[r_{ij}^2 + 2(y_{ij} - y_{oj})^2] + 2P_{2j} (x_{ij} - x_{oj}) (y_{ij} - y_{oj}) \qquad \text{(A.10b)}$$

respectivamente, onde $r_{ij}^2 = (x_{ij} - x_{oj})^2 + (y_{ij} - y_{oj})^2$.

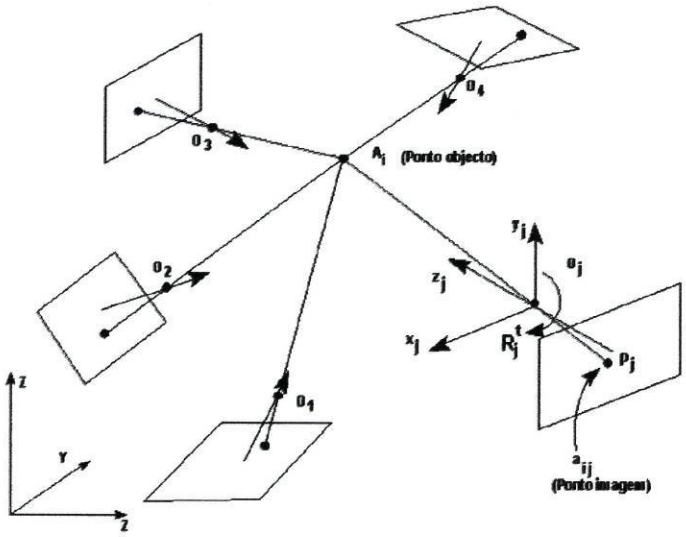


Figura A.7. – Configuração convergente multi-imagem (Cooper, 1996).

As equações de colinearidade são então escritas para cada imagem de cada ponto no terreno, sendo combinadas numa solução simultânea para o cálculo dos parâmetros desconhecidos (Mcglone, 1989). Isto é feito da mesma maneira que se faz um ajustamento por feixes, como descrito no *Manual of Photogrammetry* (Slama, 1980).

A concepção de uma configuração ideal da rede fotogramétrica a ser utilizada é, em termos teóricos, bastante fácil de obter, uma vez que bastaria fazer a selecção de uma rede genérica apropriada. Infelizmente, na prática, tem de se ter em conta uma série de factores que condicionam o processo de optimização do desenho da rede. Apresenta-se, seguidamente, um resumo das condições ou restrições que podem afectar a configuração das estações fotográficas, impedindo assim, a obtenção de uma rede robusta:

- Escala da imagem – a precisão da triangulação é directamente proporcional à escala da imagem, que por sua vez determina a máxima distância permitida entre a câmara e o objecto.

- Resolução – a resolução do objecto na imagem tem de ser suficiente para que seja possível efectuar as medições na imagem com a precisão desejada. Este aspecto tem impacto no desenho dos alvos, quando estes são artificiais e também na selecção da escala da imagem. Quando os alvos são naturais tem impacto na distância câmara-objecto.

- Local de trabalho – obstruções existentes na área de trabalho condicionam, sem dúvida, a configuração das estações fotográficas, sendo mais problemático no que diz respeito à escala do que propriamente à optimização da geometria de intersecção dos raios. Pode então ser

necessário recorrer a câmaras de grande angular, ou a pares estereoscópicos suplementares para cobrir, por exemplo, uma fachada onde o operador está limitado no que diz respeito à distância a que se pode colocar.

- Profundidade de campo - a precisão das medições na imagem, especialmente em modo de medição manual, é muito influenciado pela focagem das lentes. Este factor condiciona tanto a escala da imagem como a geometria de configuração do sensor.

- Ângulo de incidência – Este factor implica que se arranje, no desenho da rede, um compromisso entre o grau de convergência e o ângulo de incidência, para que este seja aceitável.

- Número e distribuição dos pontos imagem – o número de pontos (alvos) numa rede tem pouco impacto no que respeita à precisão da triangulação dos pontos objecto, desde que haja pontos suficientes que suportem a orientação externa, que é feita recorrendo ao ajustamento por feixes em redes multiestação, e por ajustamento por feixes para auto calibração em configurações de uma única câmara. A confiança estatística da orientação, por outro lado, é normalmente melhorada havendo maior redundância, fornecida pela medição de mais pontos. O número e distribuição de pontos medidos na imagem também influenciam fortemente o estabelecimento dos parâmetros de calibração do sensor.

- Contribuição para os ângulos de intersecção - A contribuição de uma única estação fotográfica para a configuração de uma dada rede não pode ser tratada isoladamente, uma vez que pode contribuir, tanto para o fortalecimento da geometria de intersecção dos raios, como para um aumento na precisão da triangulação.

- Campo de visão – se fosse possível ter todos os alvos em cada uma das estações seria muito interessante, uma vez que permitiria uma simplificação da rede e seriam precisas menos fotografias/imagens, havendo deste modo, uma homogeneidade na precisão da triangulação. Na maioria dos casos, especialmente para levantamentos arquitecturais, a natureza do objecto não permite que todos os pontos de interesse estejam em todas as fotografias tiradas. Normalmente, recorre-se a novas estações que serão depois ligadas às anteriores, por pontos de ligação. Estas estações constituem o que Mason (1995a) chama de sub-redes, que depois de ligadas à rede principal possuem uma geometria suficientemente forte.

- Visibilidade – muitas vezes existem obstruções na área de trabalho (árvores, por exemplo) que não permitem que todos os pontos apareçam nas fotografias em estavam previstas. Este facto

pode afectar a precisão da triangulação, num ponto objecto, uma vez que a robustez da geometria de intersecção pode ficar comprometida se o número de raios descer abaixo do obtido com a rede básica.

- Mason (1995a) criou uma ilustração muito simples (Figura A.8) mostrando o impacto combinado de alguns destes factores no que diz respeito à área que fica disponível para o posicionamento das estações fotográficas, para um objecto simples e visto a duas dimensões. As situações podem tornar-se mais complicadas dependendo da complexidade do objecto e da envolvente ao mesmo.

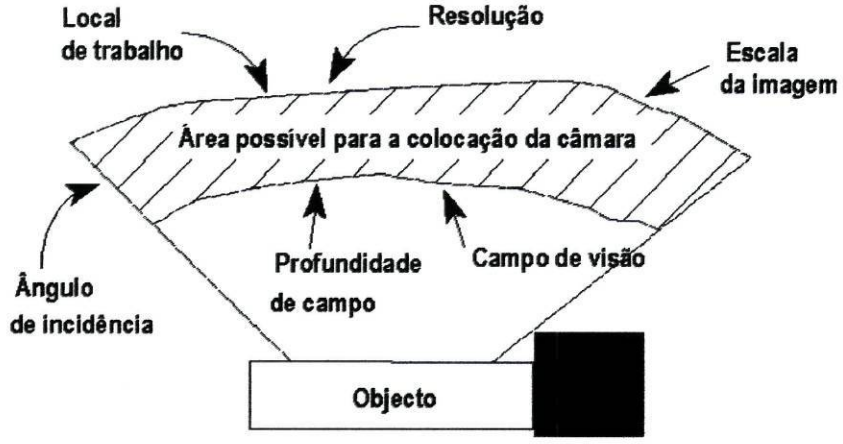


Figura A.8 – Esquema elucidativo da influência que certas condições têm na colocação da câmara.

APÊNDICE B

RECTIFICAÇÃO DIGITAL

A descrição aqui presente foi baseada nos apontamentos da Cadeira de Fotogrametria II leccionada na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda.

O objectivo da rectificação é transformar a fotografia original numa rectificada, isto é, corrigida dos ângulos de rotação. Isto significa que, assumindo o objecto plano, a projecção central do objecto é substituída por uma projecção projectiva. Para isso são necessários os parâmetros de transformação da orientação externa (6) e interna (3), que, como o objecto se assume plano, se podem reduzir a 8 parâmetros.

A rectificação digital produz uma imagem rectificada a partir de uma outra imagem. O procedimento é o seguinte:

1) Tendo as coordenadas de pelo menos 4 pontos de controlo determinam-se os parâmetros de transformação que relacionam o objecto (que se assume plano) com a fotografia. Portanto, pelo menos 4 pontos deverão ser medidos na fotografia e as coordenadas terreno (X,Y) terão que ser também introduzidas no computador.

Obtêm-se assim os parâmetros, usando as equações de colinearidade simplificadas ((B.1a) e(B.1b) (pois Z é aí considerado função linear de X e Y):

$$a_1X_i+a_2Y_i+a_3-a_7x_iX_i-a_8x_iY_i-x_i=0 \qquad \text{(B.1a)}$$

$$a_4X_i+a_5Y_i+a_6-a_7y_iX_i-a_8y_iY_i-y_i=0 \qquad \text{(B.1b)}$$

e o método dos mínimos quadrados (para mais de 4 pontos que é o que acontece na prática). Assim, dados quaisquer pontos no objecto com coordenadas XY pode-se calcular as coordenadas imagem x_f e y_f.

2) Escolhe-se o tamanho do pixel no objecto, s, e calculam-se as coordenadas no objecto XY dos 4 cantos da fotografia resolvendo as equações acima em ordem a X e Y. O número de linhas **nl** e colunas **nc** da nova fotografia rectificada são então dados por:

$$nl = (Ymax - Ymin)/s \quad \text{(B.2a)}$$

$$nc = (Xmax - Xmin)/s \quad \text{(B.2b)}$$

onde Ymax, Ymin, Xmax e Xmin representam os valores máximos e mínimos das coordenadas objecto dos cantos da fotografia.

Obtêm-se assim a seguinte malha (Figura B.1):

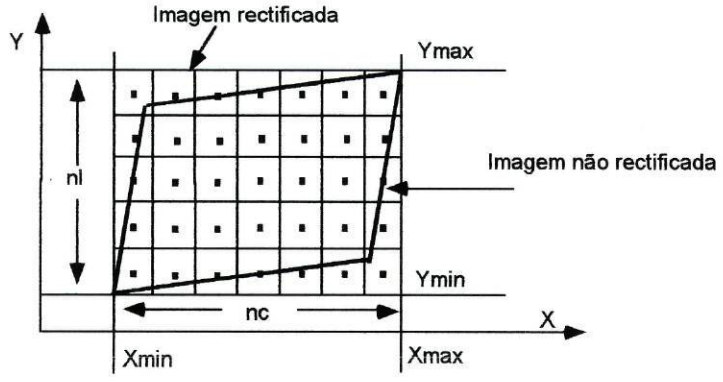


Figura B.1 - Malha de pixels da imagem rectificada.

Para cada pixel nessa malha de coordenadas l′ e c′, para o qual conhecemos XY, podemos calcular x_f e y_f (na fotografia original). Para isso basta usar as fórmulas:

$$Y = -0{,}5.s + Ymax - l'.s, \text{ pois } l' = -0{,}5 + (Ymax - Y)/s \quad \text{(B.3a)}$$

$$X = 0{,}5.s + c'.s + Xmin, \text{ pois } c' = -0{,}5 + (X - Xmin)/s \quad \text{(B.3b)}$$

e

$$x_f = (a_1X + a_2Y + a_3)/(a_7X + a_8Y + 1) \quad \text{(B.4a)}$$

$$y_f = (a_4X + a_5Y + a_6)/(a_7X + a_8Y + 1) \quad \text{(B.4b)}$$

para além disso, os 8 parâmetros a_i já foram determinados em 1).

Como a imagem original está na forma digital, temos de converter xf e yf a coordenadas pixel (para se poder obter o valor de brilho). Se tomarmos o seguinte sistema pixel (Figura B.2) temos:

$$xf=xc+xo \qquad xc=(c-co).sx \qquad (B.5a)$$

$$yf=yc+yo \qquad yc=(lo-l).sy \qquad (B.5b)$$

Substituindo vem:

$$c=(xf-xo)/sx+co \qquad (B.6a)$$

$$l=(yo-yf)/sy+lo \qquad (B.6b)$$

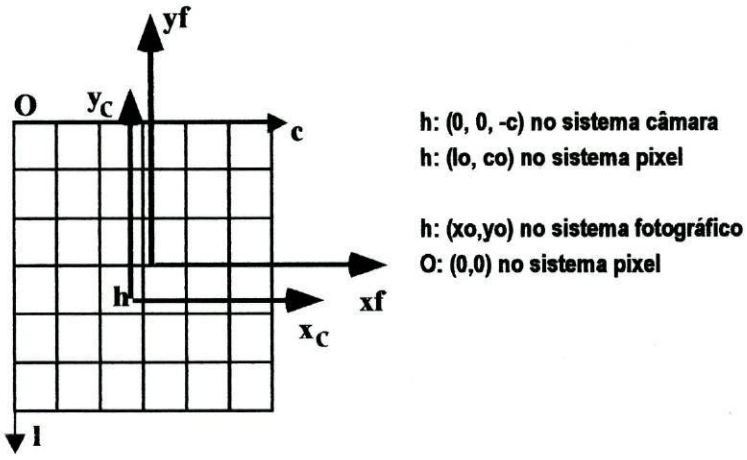


Figura B.2 - Sistema pixel, fotográfico e câmara.

O valor de brilho associado a c e l pode ser obtido por interpolação.

Na prática, o computador transforma imediatamente os pixels de coordenadas l′ e c′ na imagem rectificada em pixels l e c na imagem original da seguinte forma:

$$l=(b1l'+b2c'+b3)/(b7l'+b8c'+1) \qquad (B.7a)$$

$$c=(b4l'+b5c'+b6)/(b7l'+b8c'+1) \qquad (B.7b)$$

Tendo l e c pode-se calcular o valor do brilho associado a l′, c′ (Figura B.3):

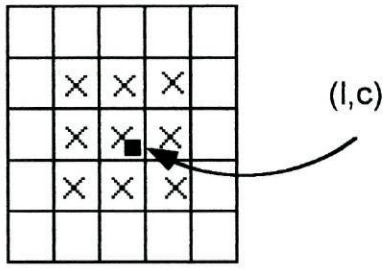


Figura B.3 - Localização do pixel (l, c) na imagem rectificada.

REFERÊNCIAS

AHMAD, A., CHANDLER, J., H., 1999, ***Photogrammetric Capabilities of the Kodak DC40, DCS420 and DCS460 Digital Cameras***, em Photogrammetric Record, 16 (94): 601-615 (Outubro 1999).

ARNOLD, D., 2000, ***Computer Graphics and Archaeology: Realism and Symbiosis***, Proceedings of ACM SIGGRAPH and EUROGRAPHICS Campfire on Computer Graphics and Archaeology, Salt Lake City, USA, May 2000.

ATKINSON K. B., 1989, ***Instrumentation for Non-Topographic Photogrammetry***, Ch. 3, pp. 15-35, em ***Non-Topographic Photogrammetry***, Second Edition, American Society For Photogrammetry and Remote Sensing, (USA: H. M. Karara, Science and Engineering Series).

BATTY, M., DODGE, M., DOYLE, S., SMITH, A., 1998, ***Modelling Virtual Urban Environments***. Working papers of CASA – Centre for Advanced Spatial Analysis. (Documento da Internet: http://www.casa.ucl.ac.uk/modelvue.pdf)

BATTY, M., SMITH, A., 2002, ***Virtuality and Cities: Definitions, Geographies, Designs***,Ch. 19, pp. 270-291, em ***Virtual Reality in Geography***. Editado por Peter Fisher e David Unwin (LONDON E NEW YORK: Taylor & Francis).

BORNAZ, L., LINGUA, A., RINAUDO, F., 2002, ***A New Software for the Automatic Registration of 3D Digital Models Acquired using Laser Scanner Devices*** em CIPA WG6 International Workshop: Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, 1-2 Set..

BOURDAKIS, V., 1999, ***On Developing Standards for the Creation of VR City Models***, em Modeling & City Planning.

BRENNER, C., BOEHM, J., GUEHRING, J.,1998, ***CAD-Based Object Recognition for a Sensor/Actor Measurement Robot***, em Simpósio da Comissão V da ISPRS, Hakodate, Japão, Junho.

BRENNER, C., 1999, ***Interactive Modelling Tools for 3D Building Reconstruction***. Photogrammetric Week '99, Stuttgart.
(Documento da Internet: http://www.ifp.uni-stuttgard.de/publications/phowo99/phowo99.htm).

BRENNER, C., HAALA, N., FRITSCH, D., 2001, ***Towards Fully Automated Reconstruction of 3D City Model Generation***, em, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images III.

CARBONNELL, M., 1989, ***Architectural Photogrammetry*** *em Non-topographic Photogrammetry*, Ch. 19, pp. 321-347, Second Edition, American Society For Photogrammetry and Remote Sensing, (USA: H. M. Karara, Science and Engineering Series).

COOPER, M. A. R., ROBSON, S., 1996, ***Theory of Close Range Photogrammetry*** em *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Ch. 2 pp. 9-51, (UK: K. B. ATKINSON, Whittles Publishing).

DALLAS, R. W. A., 1980, ***Architectural*** **and** ***Archaelogical Recording*** **em** ***Developments*** *in Close Range Photogrammetry* – 1, Ch. 5 pp. 81-116, (London: K. B. ATKINSON, Applied Science Publishers, Ltd.).

DALLAS, R. W. A., 1996, ***Architectural*** **and** ***Archaeological Photogrammetry*** **em** *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Ch. 10, pp. 283-302, (UK: K. B. ATKINSON, Whittles Publishing).

DORFFNER, L., KRAUS, K., TSCHANNERL, J., ALTAN, O., KULUR, S., TOZ, G., 2000, ***Hagia-Sophia – Photogrammetric Record of a World Cultural Heritage***, em *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Parte B5. Amsterdão.

DRAP, P., GAILLARD, G., GRUSSENMEYER, P., HARTMANN-VIRNICH, A., 2000, ***A Stone-by-Stone Photogrammetric Survey Using Architectural Knowledge Formalised on the ARPENTEUR Photogrammetric Workstation***, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Parte B5. Amsterdão.

EL-HAKIM, S.F.,BERALDIN, J. A., PICARD, M., 2002, ***Detailed 3D Reconstruction of Monuments Using Multiple Techniques*** em CIPA WG6 International Workshop: Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, 1-2 Set..

EL-HAKIM, S. F., BRENNER, C., ROTH, G., 1998, ***An Approach to Creating Virtual Environments using Range and Texture***, em Simpósio da Comissão V da ISPRS, Hakodate, Japão, Junho.

FANGI, G., FIORI, F., GAGLIARDINI, G., MALINVERNI, E. S., 2001, ***Fast and Accurate Close Range 3D Modelling by Laser Scanning System*** em CIPA 2001 International Symposium: Surveying and Documentation of Historic Buildings, Monuments, sites – Traditional and Modern Methods, University of Potsdam, Germany, 18-21 Set..

FEDAK, M., 2001, ***3D Measurement Accuracy of a Consumer-Grade Digital Camera and Retro-Reflective Survey Targets***. (Documento da Internet: http://www.photomodeler.com)

FERREIRA, R., BERNARDES, P., MARCOS, A., FREITAS, A., BUND, J., 2000, **A tecnologia Multimédia no Registo do Património Arquitectónico**, em Actas da 1ª Conferência Associação Portuguesa de Sistemas de Informação, Universidade do Minho, Dep. Sistemas de Informação.

FISHER. A., KOLBE, T. H., LANG, F., 1997, ***Integration of 2D and 3D Reasoning for building Reconstruction Using a Generic Hierarchical Model***, em Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, Birkhauser Verlag, Berlin, pp. 159-180.

FORSTNER, W., 1999, ***3D-City Models: Automatic and Semiautomatic Acquisition Methods***. Photogrammetric Week '99, Stuttgart.
(Documento da Internet: http://www.ifp.uni-stuttgard.de/publications/phowo99/phowo99.htm).

FRASER, C. S., 1989, ***Optimization of Networks in Non-Topographic Photogrammetry*** *em Non-topographic Photogrammetry*, Ch. 8, pp. 95-106, Second Edition, American Society For Photogrammetry and Remote Sensing, (USA: H. M. Karara, Science and Engineering Series).

FRITSCH, D., 2003, ***3D Building Visualization – Outdoor and Indoor Aplications***. Photogrammetric Week '03, Stuttgart, Alemanha.

FRYER, J. G., BROWN, D. C., 1989, ***Lens Distortion for Close-Range Photogrammetry*** , em Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52(1) pp. 51-58.

FRYER, J. G., 1996, ***Introduction* em *Close Range Photogrammetry and Machine Vision***, Ch. 1 pp. 1-7, (UK: K. B. ATKINSON, Whittles Publishing).

GOMES PEREIRA, L. M.,1996, ***A Robust and Adaptive Matching Procedure for Automatic Modelling of Terrain Relief***. Tese de Doutoramento (Holanda: Delft University Press).

GONZO, L., GOTTARDI, M., COMPER, F., SIMONI, A., BERALDIN, J. A., BLAIS, F., RIOUX, M., DOMEY, J., 2001, ***Smart Sensors for 3D Digitalisation***, Workshop 2001 Italy-Canada on 3D Digital Imaging and Modelling Application of: Heritage, Industry, Medicine & Land, Padova, Italy, 3 – 4 Abril (Documento da Internet: http://www.vit.iit.nrc.ca/VIT.html)

GRUEN, A., 1997, ***Automation in Building Reconstruction***. Photogrammetric Week '97, Stuttgart. (Documento da Internet: http://www.ifp.uni-stuttgard.de/publications/phowo97/phowo97.htm).

GRUEN, A., DAN, H., 1997, ***TOBAGO – A Topology Builder for the Automated Generation of Buildings Models***. Em Automated Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images(II), Birkhauser Verlag, Berlim, pp. 149-160. (Acedido em Elsevier)

GRUEN, A., WANG, X., 1999, CyberCity Modeler, a tool for interactive 3-D City Model Generation. Photogrammetric Week '99, Stuttgart, 47, pp. 317-327. (Documento da Internet: http://www.ifp.uni-stuttgard.de/publications/phowo99/phowo99.htm).

GRUEN, A., 2001, ***Cities from the Sky: Photogrammetric Modelling of CyberCity is Coming of Age***, em Geoinformatics, Vol. 4, Nº. 10, pp. 30-33.

GRUSSENMEYER, P., HANKE, K., STREILEIN, A., 2002, ***Architectural Photogrammetry***, em *Digital Photogrammetry*, Ch. 4 pp. 300-339, editado por KASSER, M., EGELS (London and New York: Taylor & Francis).

GRUSSENMEYER, P., DRAP, P., KOEHL, M., BLAISE, J-Y., 1999, *THIFON and ARPENTEUR: Simple Photogrammetric Software Packages for Stereoplotting*, Proceedings of ISPSR/WG V/I, V/5 Workshop, Thessaloniki, Grécia.

GUIMARÃES, R. C., CABRAL, J. A. S., 1997, **Estatística - Edição Revista** (Lisboa: McGraw-Hill de Portugal, L.da).

HAALA, N., BRENNER, C., 1999, ***Extraction of Buildings and Trees in Urban Environment***, em ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54 (1999), pp. 130-137 (Acedido em Elsevier Science B. V.).

HAALA, N., BRENNER, C., 1997, ***Generation of 3D City models from Airborne Laser Scanning Data***. Proceedings 3rd EARSEL Workshop on LIDAR Remote Sensing on Land and Sea. Tallinn, Estónia, pp. 105-112 (Acedido em Elsevier).

HAALA, N., HAHN, M., 1996, ***Data Fusion for the Detection and Reconstruction of Buildings***, em Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Birkhauser Verlag, Berlim, pp. 211-220. (Acedido em Elsevier)

HECKBERT, P., S., 1986, ***Survey of Texture Mapping***, em IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 56-67, Novembro.

HOPPE, H., 1997, ***View-Dependent Refinement of Progressive Meshes***. ACM Proceedings of SIGGRAOH' 97, pp. 189-198.

JACHIMSKI, J. J., ZIELINSKI, J., M., 1996, ***Digital Stereoplotter for historic monuments recording*** em International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vienna: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI (B5), p. 259-263.

KARARA (1), H. M., 1980, ***Non-Topographic Photogrammetry***, em *Manual of Photogrammetry*, Fourth Edition, Ch. 16 pp. 785-882, (Falls Church: C. C. SLAMA, American Society of Photogrammetry).

KARARA, H. M., 1980, ***Non Metric Cameras*** em *Developments in Close Range Photogrammetry* – 1, Ch. 4 pp. 63-80, (London: K. B. ATKINSON, Applied Science Publishers, Ltd.).

KENNERT, A., TORLEGARD, I., 1980, ***An Introduction to Close Range Photogrammetry***, em *Developments in Close Range Photogrammetry* – 1, Ch. 1 pp. 1-14, (London: K. B. ATKINSON, Applied Science Publishers, Ltd.).

KRAUS, K., 1993, ***Photogrammetry - Fundamentals and Standard Processes***, Vol. I, Fourth edition (Bonn: Ferd. Dummlers Verlag).

KRAUS, K., 1997, ***Photogrammetry - Advanced Methods and applications***, Vol. II, Fourth edition (Bonn: Ferd. Dummlers Verlag).

MACGLONE, J. C., 1989, ***Analytic Data-Reduction Schemes in Non-Topographic Photogrammetry*** *em Non-topographic Photogrammetry*, Ch. 4, pp. 37-57, Second Edition, American Society For Photogrammetry and Remote Sensing, (USA: H. M. Karara, Science and Engineering Series).

MARTINS, J. M., ZIMMERMENN, C. C., LOCH, C., 1998, **Calibração da Câmara Pentax PAMS 645 Utilizada em Trabalhos de Fotogrametria à Curta Distância**, em COBRAC 98 – Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, UFSC Florianópolis, (Outubro) (Documento da Internet: http://geodesia.ufsc.br/geodesia-online/arquivo/cobrac98(139/139.htm)

MASON, S., 1995a, ***Conceptual Model of the Convergent Multistation Network Configuration Task***, em Photogrammetric Record, 15(86): 277-299.

MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S., MCGLONE, J. C., 2001, ***Introduction to Modern Photogrammetry***, (New York: John Wiley & Sons, Inc.).

MILLS, J. P., PEIRSON, G. C., NEWTON, I., BRYAN, P. G., 2000, ***Photogrammetric Investigation into de Suitability of Desktop Image Measurement Software for Architectural Recording***, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Parte B5. Amsterdão.

MORTENSON. M. E., 1997, ***Geometric Modeling***, 2nd. Edition (New York: Jonh Wiley and sons)

OGLEBY, C. L., 2001, ***Olympia – Home of the Ancient and Modern Olympic Games. A VR 3D Experience***, Proceedings of International Workshop on Recreating the Past – Visualization and Animation of Cultural Heritage, Ayutthaya, Tailândia. (Documento da Internet: http://www.gisdevelopment.net/events/isprs/2001/ts3/isprs3002pf.htm)

PAPPA, R., GIERSCH, L. R., QUAGLIAROLI, J. M., 2001, ***Photogrammetry of a 5m Inflatable Space Antenna with Consumer Digital Cameras***. (Documento da Internet: http://www.photomodeler.com)

PATIAS, P., 2001, ***Photogrammetry and Visualization***. Technical Report, ETH Zurich (Documento da internet: http://www.photogrammetry.ethz.ch/research/guest.html).

PIMENTEL, J., BATISTA, N., GOES, L., DIONÍSIO, J., 2000, **Construção e Gestão da Complexidade de Cenários Urbanos 3D em Ambientes Virtuais Imersivos**. Projecto Lisboa Virtual do IST/SAE e da CML/DEIU.

POMASKA, G., 2001, ***Image Acquisition for Digital Photogrammetry using "Of the Shelf" and Metric Cameras***, em CIPA 2001 International Symposium: Surveying and Documentation of Historic Buildings, Monuments, sites – Traditional and Modern Methods, University of Potsdam, Germany, 18-21 Set..

REDDY, M., 1999, ***Specification and Evaluation of Level of Detail Selection Criteria,*** Virtual Reality: Research, Development and Application, Vol. 3, nº2, pp. 132-143.

REIS, E., MELO, P., ANDRADE, R., CALAPEZ, T., 1999, **Estatística Aplicada**, Vol. 2, 3ª Edição revista, (Lisboa: Edições Silabo, L.da).

REMONDINO, F., 2003, ***From Point Cloud to Surface: The Modeling and Visualization Problem*** em International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV-5/W10.

ROSENZWEIG, G., 2001, ***Using Macromedia Director***, Special Edition, (Indianopolis:Que).

RUTHER, H., FRASER, C., GRUEN, A., BUEHRER, T., 2001, ***The Recording of Bet Giorgis, A 12th Century Rock-Hewn Church in Ethiopia***, Proc. of International Workshop on *Recreating the Past – Visualization and Animation of Cultural Heritage*, Ayutthaya, Tailândia (Documento da Internet: http://www.gisdevelopment.net/events/isprs/2001/ts3/isprs3002pf.htm).

SCHERER, M., 2001, ***About the Synthesis of Different Methods in Surveying***, Proc. of International Workshop on *Recreating the Past – Visualization and Animation of Cultural Heritage*, Ayutthaya, Tailândia.

(Documento da Internet: http://www.gisdevelopment.net/events/isprs/2001/ts3/isprs3006pf.htm).

SHORTIS, M. R., BEYER, H. A., 1996, ***Sensor Technology for Digital Photogrammetry and Machine Vision*** em *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Ch. 2 pp. 9-51, (UK: K. B. ATKINSON, Whittles Publishing).

SLAMA, C. C., 1980, ***Manual of Photogrammetry***, Fourth Edition, (Falls Church: American Society of Photogrammetry).

TAIT, D. A., 1980, ***Instrumentation for Close Range Photogrammetry***, em *Developments in Close Range Photogrammetry* – 1, Ch. 1 pp. 1-14, (London: K. B. ATKINSON, Applied Science Publishers, Ltd.).

TRINGHAM, R., 2000, ***Virtually Reality, Real and Surreal Places in the Past***, em Proceedings of ACM SIGGRAPH and EUROGRAPHICS Campfire on Computer Graphics and Archaeology, Salt Lake City, USA, May 2000.

ULM, K., 2003, ***Improved 3D City Modeling with Cybercity-Modeler (CC-MODELER™) using Aerial, Satellite Imagery and Laser Scanner Data***, em Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, Tarasp-Vulpera, Suiça (Documento da Internet: http://www.photogrammetry.ethz.ch/tarasp_workshop/program.html).

VAN DEN HEUVEL, F., A., 2000, ***Trends in CAD-based Photogrammetric Measurement***, em *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Parte B5. Amsterdão.

VARSHOSAZ, M., 2003, ***True Realistic 3D Models of Buildings in Urban Areas***, em WorkShop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, Tarasp-Vulpera, Suiça (Documento da Internet: http://www.photogrammetry.ethz.ch/tarasp_workshop/program.html).

WEFERLING, U., 2000, ***The Integration of Conventional and Automatic Photogrammetric Methods to the Building Survey in Historic Building Research***, em *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Parte B5. Amsterdão.

WEIDNER, U., FORSTNER, W.,1995, ***Towards Automatic Building Extraction from High-Resolution Digital Elevation Models***, em ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 50(4), pp. 38-49. (Acedido em Elsevier).

WEHR, A., LOHR, U., 1999, ***Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview***, em ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 68-82.

WOLF, P. R., 1983, ***Elements of Photogrammetry***, 2nd Edition, Ch. 8, pp. 477-513, (New York: McGraw Hill).

WU, B. Y., 1998, ***Roof Reconstruction from Digital Images and 2D CAD Information***. Master Thesis, Department of Surveying Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan, R.O.C..

XEREZ, C., 1969, **Topografia Geral**, Cadernos Técnicos do IST, Lisboa.

ZIEMANN, H., EL-HAKIM, S. F., 1982, ***System Calibration versus self-calibration*** em International Archives of Photogrammetry, 24 (1), pp. 117-122.

ZLATANOVA, S., TEMPFLI, K., 2000, ***Modelling for 3D GIS: Spatial Analysis and Visualization Through the Web***, em *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Parte B5. Amsterdão.

REFERÊNCIAS URL

URL1: http://www.sppc.pt/VENEZA.htm

URL2: http://www.photomodeler.com

URL3: http://www.3dbuilder.com

URL4: http://www.kodak.com

URL5: http://www.metacreations.com

URL6: http://www.riegl.com

URL7: http://scanning.fh-mainz.de

URL8: http://www.esteio.br

URL9: http://www.arpenteur.com

URL10: http://www.skylinesoft.com

URL11: http://www.cai.com/cosmo

URL12: http://www.pci.geomatics.com

URL13: http://www.virtualgis.com

URL14: http://www.web3d.org/vrml/vrml.htm

URL15: http://www.coolfun.com

URL16: http://www.shapequest.com

URL17: http://www.okino.com

URL18: http://www.tb-software.com

Zulmira Maria Santos Pereira Santos

Elaboração de um Arquivo Arquitectónico inserido num Modelo Tridimensional Urbano

FACULDADE DE CIÊNCIAS

(CD MULTIMÉDIA)

Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
Setembro, 2003

