



**Rui Manuel Freitas
Ferreira**

**RECONSTRUÇÃO DE MODELOS CAD 3D BASEADA
EM IMAGEM FOTOGRÁFICA DIGITAL**



**Rui Manuel Freitas
Ferreira**

**RECONSTRUÇÃO DE MODELOS CAD 3D BASEADA
EM IMAGEM FOTOGRÁFICA DIGITAL**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Dr. Paulo Bártolo, Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

o júri

presidente

Prof. Dr. Francisco José Malheiro Queirós de Melo
professor associado da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Dr. José António de Oliveira Simões
professor associado com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof^a. Dra. Inês Ascenso Pires
professora auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

Prof. Dr. Paulo Jorge da Silva Bártolo
professor coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

agradecimentos

Aos meus orientadores, pela oportunidade e paciência, compreensão e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

À minha família que sempre acreditou em mim e me encorajou.

À minha esposa, Solange, pela ajuda e compreensão da minha escolha, apoio e dedicação.

A todos os que me acompanharam neste trabalho o meu muito obrigado.

Dedico aos meus avós.

palavras-chave

Engenharia Inversa, Reconstrução 3D, CAD, Prototipagem Rápida, Visão Humana e Computacional,

resumo

O processo de reconstrução de modelos computacionais tridimensionais (CAD3D) constitui uma importante área de investigação com variadas aplicações que incluem a engenharia inversa, assim como outras tecnologias assistidas por computador tais como: a engenharia assistida por computador, o fabrico assistido por computador e a prototipagem rápida. Tradicionalmente, as abordagens de reconstrução de geometrias 3D de peças técnicas são baseadas em informação bidimensional (2D) relativa a duas ou três projecções ortogonais (imagens ortográficas 2D). Adicionalmente, estas abordagens revelam pouca eficiência e flexibilidade em relação à reconstrução geométrica 3D de geometrias complexas. Refira-se igualmente que grande parte dos objectos usados em engenharia apresenta em regra geometrias complexas. Finalmente, as abordagens tradicionais estão limitadas à existência de desenhos 2D, o que pode inviabilizar a sua utilização em certas aplicações, nomeadamente onde esta informação ortográfica não exista.

Este projecto de investigação pretende apresentar soluções para os referidos problemas. Tal passará pelo desenvolvimento de novas técnicas de reconstrução geométrica 3D que utilizem três, duas, ou apenas uma imagem bidimensional. Estas imagens em perspectiva serão obtidas através de uma câmara fotográfica digital de baixo custo, e por conseguinte, todos os dados digitais 2D necessários ao processo de reconstrução de um modelo CAD 3D serão sempre facilmente obtidos.

keywords

Reverse Engineering, 3D Reconstruction, CAD 3D, Rapid Prototyping, Human and Computer Vision,

abstract

The process of reconstruction of three-dimensional computer models CAD3D, is an important area of research with various applications that include reverse engineering, and other computer-assisted technologies such as: a computer-assisted engineering, manufacture and computer-assisted rapid prototyping . Traditionally, approaches the reconstruction of 3D geometry of parts technical information are based on two-dimensional (2D) for two or three orthogonal projections (2D orthographic images). Additionally, these approaches show little efficiency and flexibility on the geometric 3D reconstruction of complex geometries. In addition, many of the objects used in engineering presents a rule complex geometries. Finally, traditional approaches are limited to the existence of 2D drawings, which can prevent its use in certain applications, particularly where there is spelling this information. This research project aims to provide solutions to those problems. This will require the development of new techniques for reconstruction using 3D geometric three, two, or only a two-dimensional image. These images in perspective will be obtained through a digital camera at low cost, and therefore, all 2D digital data necessary for the reconstruction of a 3D CAD model will always be easily obtained.

Índice Geral

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| CAPITULO 1 | INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 | VISÃO HUMANA | 20 |
| 1.2 | ESTRUTURA DA TESE | 24 |
| CAPITULO 2 | A ENGENHARIA INVERSA | 25 |
| 2.1 | INTRODUÇÃO | 26 |
| 2.2 | MÉTODOS DE DIGITALIZAÇÃO COM CONTACTO FÍSICO | 29 |
| 2.2.1 | <i>Método Manual</i> | 29 |
| 2.2.2 | <i>Sistemas de Medição por Coordenadas (CMM)</i> | 30 |
| 2.2.3 | <i>Fatiamento (Slicing)</i> | 33 |
| 2.3 | MÉTODOS DE DIGITALIZAÇÃO SEM CONTACTO FÍSICO | 34 |
| 2.3.1 | <i>Métodos transmissivos</i> | 34 |
| 2.3.1.1 | Tomografia computadorizada (TC) | 34 |
| 2.3.1.2 | Ressonância Magnética (RM) | 40 |
| 2.3.1.3 | Ultra-sonografia | 43 |
| 2.3.2 | <i>Métodos Ópticos</i> | 44 |
| 2.3.2.1 | Técnicas activas | 44 |
| 2.3.2.2 | Técnicas passivas | 51 |
| 2.4 | SUMÁRIO | 53 |
| CAPITULO 3 | RECONSTRUÇÃO CAD 3D | 55 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 56 |
| 3.2 | MODELO DE MARR | 58 |
| 3.3 | AQUISIÇÃO DE DADOS | 60 |
| 3.3.1 | <i>Determinação de distâncias a partir de uma imagem fotográfica</i> | 63 |
| 3.4 | PROCESSAMENTO | 64 |
| 3.4.1 | <i>Calibração</i> | 64 |
| 3.4.1.1 | Considerações geométricas | 66 |
| 3.4.2 | <i>Binarização</i> | 74 |
| 3.4.3 | <i>Operações morfológicas</i> | 78 |
| 3.4.4 | <i>Detecção de fronteiras</i> | 85 |
| 3.5 | MODELAÇÃO 3D | 94 |
| 3.5.1 | <i>Reconstrução 3D</i> | 94 |
| 3.5.2 | <i>Definição de um modelo em formato STL</i> | 96 |
| CAPITULO 4 | RESULTADOS OBTIDOS | 99 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 100 |

| | | |
|---|--|------------|
| 4.2 | CASO DE ESTUDO 1 – VASO DE COR AMARELA..... | 101 |
| 4.3 | CASO DE ESTUDO 2 – COPO DE COR BRANCA..... | 105 |
| 4.4 | CASO DE ESTUDO 3 – CÁLICE..... | 109 |
| 4.5 | CASO DE ESTUDO 4 – VASO DE COR VERMELHA..... | 113 |
| 4.6 | CASO DE ESTUDO 5 – CANECA DE COR BRANCA..... | 118 |
| 4.7 | RESUMO RESULTADOS..... | 122 |
| CAPITULO 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS..... | | 123 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Formação da imagem na retina | 21 |
| Figura 1.2 - Estrutura do olho humano..... | 22 |
| Figura 2.1 - A Engenharia Inversa no processo de desenvolvimento conceptual (Alves, 2006)..... | 27 |
| Figura 2.2 – Etapas associados ao processo de Engenharia Inversa (Bártolo, 2001) | 28 |
| Figura 2.3 - Classificação dos métodos de aquisição de dados (Bibanda el al, 1991)..... | 29 |
| Figura 2.4 - Sonda de contacto de um sistema CMM..... | 32 |
| Figura 2.5 - Representação da atenuação do raio-x incidente num corpo genérico..... | 35 |
| Figura 2.6 - Definição de imagens 3D em tomografia utilizando os conceitos de pixel e voxel..... | 36 |
| Figura 2.7 - a) sistema TC. b) Representação ampola, colimador e detector (Hoffman e Chon, 2005) | 37 |
| Figura 2.8 - Processo de tomografia por emissão..... | 39 |
| Figura 2.9 – Processo de ressonância magnética..... | 41 |
| Figura 2.10 - Exemplo de aparelho de ultra-sons e de transdutores | 44 |
| Figura 2.11 - Princípio de triangulação ponto laser..... | 45 |
| Figura 2.12 - Triangulação por linha laser..... | 46 |
| Figura 2.13 - Comparação entre a da digitalização por contacto e a digitalização laser | 47 |
| Figura 2.14 - Problema de sombras e oclusões..... | 47 |
| Figura 2.15 - Solução possível para o problema das oclusões..... | 48 |
| Figura 2.16 - Iluminação codificada. a) Objecto a digitalizar. b) Projecção de padrões. c) Modelo digital..... | 49 |
| Figura 2.17 - Técnica de modulação temporal | 49 |
| Figura 2.18 - Reconstrução digital usando-se técnicas passivas..... | 52 |
| Figura 2.19 – Princípio de triangulação usando duas câmaras | 52 |
| Figura 3.1 - Fluxograma do algoritmo implementado..... | 57 |
| Figura 3.2 – Estrutura do código de reconstrução de objectos digitais desenvolvido | 58 |
| Figura 3.3 - Imagem real e imagem convertida na forma matricial..... | 61 |
| Figura 3.4 - Imagem matriz..... | 62 |
| Figura 3.5 - Imagem com as respectivas 3 matrizes bidimensionais (Help Matlab®) | 62 |
| Figura 3.6 - Matrizes R, G e B da imagem digital indicada na Figura 3.2, em níveis de cinza..... | 62 |
| Figura 3.7 - Intensidade R(Red) em alguns pixels(canto sup esq) da imagem indicada na Figura 3.3..... | 63 |
| Figura 3.8 - Técnica de focagem | 63 |
| Figura 3.9 - Determinação da distancia absoluta de um objecto esférico a partir do conhecimento da sua geometria..... | 64 |
| Figura 3.10 - Método de calibração proposto por Zhang | 66 |
| Figura 3.11 - Princípio de calibração..... | 67 |
| Figura 3.12 - Principais distorções em imagens lineares..... | 72 |
| Figura 3.13 - Distorções radiais..... | 72 |
| Figura 3.14 - Módulos computacionais da arquitectura de <i>Otsu</i> | 75 |
| Figura 3.15 – a) Imagem original b) Histograma c) Imagem binarizada..... | 77 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.16 - a) Imagem original b) Histograma c) Imagem binarizada | 78 |
| Figura 3.17 – Algoritmo fundamental das operações morfológicas a realizar sobre as imagens calibradas e binarizadas..... | 79 |
| Figura 3.18 - Operador <i>majority</i> (matriz da imagem <i>I</i> e da imagem <i>Im</i>)..... | 81 |
| Figura 3.19 - Exemplo do operador <i>majority</i> | 82 |
| Figura 3.20 - Operador <i>fill</i> | 83 |
| Figura 3.21 – Exemplo de aplicação da operação da subtração binária..... | 83 |
| Figura 3.22 – Exemplo de aplicação da operação da subtração binária..... | 83 |
| Figura 3.23 – Manipulação de um só objecto na imagem | 84 |
| Figura 3.24 - Operador <i>Shrink</i> com <i>threshold</i> 0.802 | 84 |
| Figura 3.25 – Operador <i>Shrink</i> com <i>threshold</i> 0.931 | 85 |
| Figura 3.26 - Função <i>Gaussiana</i> a) e respectivas 1.ª e 2.ª derivada (b, c) | 86 |
| Figura 3.27 – Identificação dos pontos considerados, pico na 1.ª derivada de função <i>Gaussiana</i> b) e inflexão na 2.ª derivada a função <i>Gaussiana</i> c)..... | 87 |
| Figura 3.28 – Operação de eliminação de <i>Não-Máximo</i> | 88 |
| Figura 3.29 - Exemplo de objecto testado (copo)..... | 91 |
| Figura 3.30 - Exemplo de outro objecto testado (vaso)..... | 92 |
| Figura 3.31 - Diferentes parametrizações do operador de <i>Canny</i> | 92 |
| Figura 3.32 - Interface de alteração de <i>threshold</i> e visualização de imagem binarizada..... | 93 |
| Figura 3.33 - Fluxograma de todo o processo | 94 |
| Figura 3.34 - Modelação 3D..... | 95 |
| Figura 3.35 - Modelação Objecto 3D | 96 |
| Figura 3.36 - Ficheiro STL em ASCII (as coordenadas dos vértices dos triângulos são genericamente representadas por x-y-z) | 97 |
| Figura 3.37 - Orientação da normal e numeração dos vértices de cada triângulo | 97 |
| Figura 4.1 – a) Imagem com padrão calibração, b) Imagem corrigida..... | 101 |
| Figura 4.2 – Representação de plano de calibração..... | 102 |
| Figura 4.3 – a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração | 102 |
| Figura 4.4 –a) Silhueta exterior, b) Superfície exterior | 103 |
| Figura 4.5 - STL da superfície exterior | 103 |
| Figura 4.6 – a) Silhueta completa, b) Superfície interior..... | 104 |
| Figura 4.7 – a) STL da superfície interior, b) Superfície total(interior e exterior) | 104 |
| Figura 4.8 – a) Imagem com padrão calibração, b) Imagem corrigida..... | 105 |
| Figura 4.9 - Representação dos planos de calibração | 106 |
| Figuras 4.10 – a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração | 106 |
| Figura 4.11 – a) Silhueta, b) Superfície exterior | 107 |
| Figura 4.12 - STL da superfície exterior | 107 |
| Figura 4.13 –Silhueta completa..... | 108 |
| Figura 4.14 – a) Imagem com padrão calibração, b) Imagem corrigida..... | 109 |
| Figura 4.15 - Representação dos planos de calibração | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.16 – a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração | 110 |
| Figura 4.17 –a) Silhueta, b) Superfície exterior | 111 |
| Figura 4.18 - STL da superfície exterior | 111 |
| Figura 4.19 - Representação da nuvem de pontos da reconstrução | 112 |
| Figura 4.20 – a) Silhueta completa, b) Superfície total | 113 |
| Figura 4.21 – a) Imagem com padrão calibração, b) Imagem corrigida | 114 |
| Figura 4.22 - Representação dos planos de calibração | 114 |
| Figura 4.23 – a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração | 115 |
| Figura 4.24 – a) Silhueta exterior , b) Superfície exterior | 115 |
| Figura 4.25 - STL da superfície exterior | 116 |
| Figura 4.26 – a) Silhueta completa, b) Superfície total | 116 |
| Figura 4.27 - STL da superfície interior | 117 |
| Figura 4.28 - a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração..... | 118 |
| Figura 4.29 - Representação dos planos de calibração | 119 |
| Figura 4.30 - a) Imagem separada do padrão antes calibração, b) Imagem após calibragem..... | 119 |
| Figura 4.31 - a) Silhueta Exterior, b) Superfície Exterior..... | 120 |
| Figura 4.32 - STL da superfície exterior | 120 |
| Figura 4.33 - a) Silhueta completa, b) Superfície total | 121 |

Índice de tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1 - Configurações possíveis de sistemas CMM..... | 31 |
| Tabela 2.2 - Valores típicos medidos tomografia (Jackson e Thomas, 2004) | 36 |
| Tabela 2.3 - Evolução dos sistemas TC..... | 38 |
| Tabela 2.4 - Principais vantagens e desvantagens da RM | 43 |
| Tabela 4.1 – Características da máquina fotográfica utilizada | 100 |
| Tabela 4.2 – Parâmetros intrínsecos da câmara HP850..... | 100 |
| Tabela 4.3 - Caso de estudo 1: parâmetros extrínsecos da imagem..... | 102 |
| Tabela 4.4 - Caso de estudo 2: parâmetros extrínsecos da imagem..... | 105 |
| Tabela 4.5 - Caso de estudo 3: parâmetros extrínsecos da imagem..... | 109 |
| Tabela 4.6 - Caso de estudo 4: parâmetros extrínsecos da imagem..... | 114 |
| Tabela 4.7 - Caso de estudo 5: parâmetros extrínsecos da imagem..... | 118 |
| Tabela 4.8 – Tabela resumo dos resultados | 122 |

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

O processo de reconstrução de modelos computacionais tridimensionais (CAD 3D) constitui uma importante área de investigação com variadas aplicações que incluem a engenharia inversa e outras tecnologias assistidas por computador tais como: a engenharia assistida por computador, o fabrico assistido por computador e a prototipagem rápida. Tradicionalmente, as abordagens de reconstrução de geometrias 3D de peças técnicas são baseadas em informação bidimensional (2D) relativa a duas ou três projecções ortogonais (imagens ortográficas 2D). Contudo estas abordagens, revelam pouca eficiência e flexibilidade em relação à reconstrução geométrica 3D de geometrias complexas. Refira-se igualmente que grande parte dos objectos usados em engenharia apresenta em regra geometrias complexas. Finalmente, as abordagens tradicionais estão limitadas à existência de desenhos 2D, o que pode inviabilizar a sua utilização em certas aplicações, nomeadamente onde esta informação ortográfica não exista.

Com este trabalho de investigação pretende-se apresentar soluções para os referidos problemas. Tal passa pelo desenvolvimento de uma estratégia de reconstrução geométrica 3D que utiliza uma imagem bidimensional, obtida através de uma câmara fotográfica digital de baixo custo.

O sistema desenvolvido inclui um conjunto de procedimentos destinados à calibração das imagens fotográficas, à detecção e selecção automática dos contornos definidores da geometria 3D, à montagem dos contornos digitais em termos de uma única imagem 3D e à criação de superfícies definidoras do modelo CAD 3D. Este sistema insere-se no domínio da visão por computador, que engloba um conjunto de procedimentos que replicam o procedimento da visão humana.

1.1 *Visão Humana*

A percepção visual depende da formação de imagens na retina, a partir da luz irradiada ou reflectida pelos objectos. A visão consiste assim na captação dos raios luminosos que incidem sobre o sistema dióptrico – formado pela córnea, pelo cristalino, pelo humor aquoso e pelo corpo vítreo – e depois atingem a retina (Figura 1.1). A luz convertida em impulsos eléctricos é em seguida transportada através do nervo óptico até ao córtex.

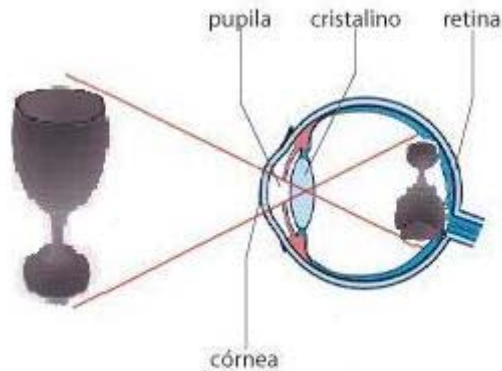


Figura 1.1 - Formação da imagem na retina

O olho humano é formado pela córnea, íris, pupila, cristalino, retina, esclera e nervo óptico (Figura 1.2):

- **Córnea:** é a primeira estrutura do olho que a luz atinge, sendo constituída por cinco camadas de tecido transparente e resistente. A camada mais externa, o epitélio, possui uma capacidade regenerativa muito grande. As quatro camadas seguintes, mais internas, proporcionam rigidez e protegem o olho de infecções,
- **Íris:** corresponde à zona colorida do olho, possuindo músculos que contribuem para a contracção e dilatação da pupila conforme as condições de luminosidade,
- **Pupila:** corresponde à abertura central da íris, através da qual a luz passa para alcançar o cristalino,
- **Cristalino:** ajusta na retina o foco de luz proveniente da pupila. Possui capacidade de ajustar a sua superfície curva de acordo com a focalização de objectos próximos ou distantes,
- **Retina:** é a membrana que preenche a parede interna em volta do olho, que recebe a luz focalizada pelo cristalino. Contem células fotossensíveis ou foto receptoras que transformam a luz em impulsos eléctricos que o cérebro processa,
- **Esclera:** estrutura que dá forma ao globo ocular,
- **Nervo óptico:** transporta os impulsos eléctricos do olho para o cérebro onde são processado.

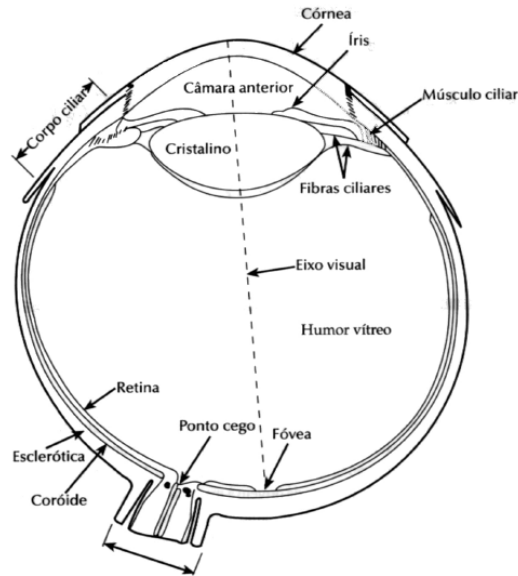


Figura 1.2 - Estrutura do olho humano

Para que um objecto seja visto, é necessário que a sua imagem incida precisamente sobre a retina, que contém dois tipos principais de células fotossensíveis, denominadas bastões e cones. Os detalhes e cores são percebidos com maior clareza na zona da retina onde não há bastões, mas apenas uma densa concentração de cones, cada um possuindo o seu próprio comprimento de onda. Na fronteira da retina, há menos cones que bastões estando estes distribuídos em grupos. Para cada grupo existe apenas uma fibra nervosa. Consequentemente, a visão é mais fraca nesta zona. Por outro lado, os bastões são mais apropriados para a percepção visual sob luz escassa e também para a identificação de movimentos.

A quantidade de luz que atinge a superfície interna do olho é regulada pelo tamanho da pupila, que, por sua vez, é controlado pelo reflexo pupilar, também chamado de reflexo paradoxal. Sob luminosidade insuficiente, a pupila dilata-se, contraindo no caso de luz intensa ou quando o olho focaliza um objecto muito próximo. Estes fenómenos ocorrem simultaneamente nas duas vistas, mesmo quando um só olho é submetido à variação luminosa.

Os elementos fotossensíveis dos olhos alteram-se com a intensidade da iluminação, mediante um fenómeno conhecido como adaptação. Os bastões da retina contêm um pigmento vermelho, denominado rodopsina ou púrpura visual que se torna mais pálida, quando a luz incide sobre ela. Cessada a iluminação, a rodopsina adquire uma coloração ainda mais intensa. A perturbação desse mecanismo produz a chamada cegueira noturna.

Quando o olho é focalizado sobre objectos distantes, estes passam a ser captados com clareza, pois produzem sobre a retina uma imagem nítida, mas os objectos próximos passam a produzir uma imagem embaçada, fora de foco. Para perceber objectos situados a curta distância, o olho altera a refração dos raios luminosos, mediante um arredondamento mais pronunciado do cristalino. O anel muscular que contorna o corpo ciliar contrai-se, provocando um relaxamento das fibras que se ligam ao cristalino, levando ao arredondamento e ao aumento da refração (*acomodação visual*).

A *visão estereoscópica* (visão em profundidade) deve-se à existência de dois olhos no indivíduo. Ao se olhar fixamente, de perto, para um objecto qualquer, primeiro com um olho e depois com o outro, vêem-se duas imagens ligeiramente diferentes. A associação das duas imagens produz a visão estereoscópica.

Do ponto de vista computacional, a visão tem sido objecto de importantes trabalhos de investigação. Gibson considerou a visão como um sistema perceptual que interage directamente com o mundo, sendo utilizada passivamente pelo observador (Gibson, 1950). Alguns anos mais tarde, Marr marca definitivamente a visão por computador ao abordar a visão como um construtor de modelos internos do mundo (Marr, 1982). Em sentido contrário aos trabalhos de Gibson estão os de Bajcsy (1985) e Aloimonos (1990) que lançaram as bases da chamada Visão Activa, ao considerarem que o observador se envolve activamente no processo de observação. O trabalho de Marr, mais detalhado na secção 3.2, constitui a base de partida deste trabalho de investigação em que se utiliza a informação visual de forma passiva para resolver um problema específico: a reconstrução digital de objectos axissimétricos ou quasi-axissimétricos.

1.2 Estrutura da Tese

A tese encontra-se dividida em cinco capítulos que descrevem de forma detalhada o trabalho desenvolvido.

Capítulo 1: Introdução.

O primeiro capítulo introduz o tema de dissertação e apresenta os principais objectivos deste trabalho.

Capítulo 2: Engenharia Inversa.

Neste capítulo descreve-se o conceito de Engenharia Inversa e as principais técnicas de captação de dados digitais. Apresentam-se igualmente as principais vantagens e limitações dos diferentes processos de captação de dados em Engenharia Inversa.

Capítulo 3: Reconstrução CAD 3D

Neste capítulo descreve-se o código de reconstrução digital de objectos desenvolvido. Este código usa apenas uma fotografia digital para reconstrução tridimensional de objectos e baseia-se no modelo de Marr e num conjunto de algoritmos elaborados em *MatLab*[®]. Os diferentes algoritmos desenvolvidos são descritos com detalhe assim como toda a formulação matemática subjacente ao seu desenvolvimento.

Capítulo 4: Resultados

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos por utilização do código descrito no capítulo anterior. Os diversos passos necessários para a reconstrução digital de objectos são apresentados e as diferentes opções detalhadamente discutidas.

Capítulo 5: Conclusões e trabalhos futuros

Os principais resultados obtidos com este trabalho de investigação são sumariados e discutidos neste capítulo onde se apresentam igualmente oportunidades abertas por este estudo e merecedoras de trabalhos de investigação a realizar no futuro.

CAPITULO 2

A ENGENHARIA INVERSA

2.1 Introdução

A geração de modelos digitais tridimensionais constitui uma etapa fundamental no processo de desenvolvimento de produto. Estes modelos, habitualmente desenvolvidos em ambiente virtual constituem elementos fundamentais permitindo a realização de tarefas associadas ao planeamento de processos, simulações numéricas, geração de programas de maquinação, prototipagem rápida e fabricação rápida.

A Engenharia Inversa constitui actualmente uma importante área de investigação, permitindo recriar um objecto físico existente através da reconstrução da sua geometria em ambiente virtual. Esta tecnologia permite a criação de modelos computacionais em situações em que os dados associados ao projecto são inexistentes ou em que as alterações ao projecto são significativas. Em Engenharia Inversa os modelos reais são transformados em modelos de engenharia, enquanto o processo de engenharia convencional transforma conceitos de engenharia e modelos em objectos reais (ver Figura 2.1). A existência de um modelo computacional representa uma vantagem competitiva para a melhoria da qualidade e eficiência do processo de concepção, análise e fabrico de um produto. A Engenharia Inversa representa igualmente uma ferramenta importante para a implementação de um sistema de engenharia concorrente ou simultânea, contribuindo para a redução dos tempos de desenvolvimento e lançamento de novos produtos no mercado (Reni, 2001).

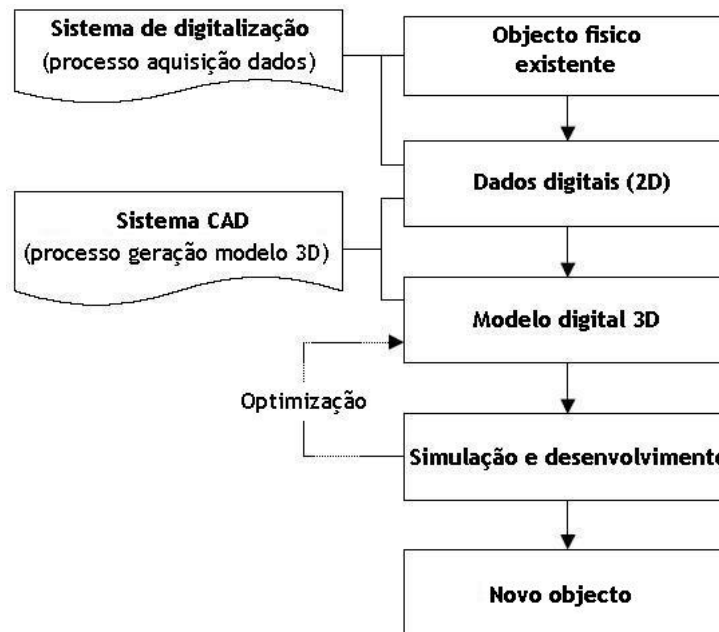


Figura 2.1 - A Engenharia Inversa no processo de desenvolvimento conceptual (Alves, 2006)

De um modo geral o processo de Engenharia Inversa compreende diversas etapas. A Figura 2.2 apresenta um esquema simplificado do processo de reconstrução virtual de modelos físicos. De notar que o processo não é totalmente sequencial ocorrendo várias iterações e sobreposições de fases que não são indicadas na figura por questões de simplificação.

Idealmente os modelos obtidos por Engenharia Inversa devem exibir as mesmas características geométricas do modelo original. Contudo, os modelos obtidos são apenas aproximados, fruto de imprecisões, de erros numéricos e de aproximação que ocorrem durante o processo de reconstrução.



Figura 2.2 – Etapas associados ao processo de Engenharia Inversa (Bártolo, 2001)

O processo de aquisição de dados representa a primeira etapa do processo de Engenharia Inversa. Esta fase destina-se à obtenção dos dados geométricos necessários à representação 3D do objecto e constitui uma etapa crítica no processo de Engenharia Inversa uma vez que influencia a qualidade geométrica dos modelos obtidos. Vários métodos de captação de dados digitais têm vindo a ser desenvolvidos tal como se indica na Figura 2.3, e se descreve com detalhe neste Capítulo. Cada método envolve um processo de interacção específico com o objecto. Deste modo existem métodos não destrutivos que envolvem a definição das superfícies interior e exterior dos objectos através da utilização de técnicas com contacto e sem contacto (Varady *et al*, 1997). Os métodos destrutivos envolvem a remoção de material e correspondem a processos como a tomografia computadorizada abrasiva (Chang *et al*, 2006, 2003). Cada método apresenta igualmente vantagens e desvantagens exigindo um processo cuidadoso de selecção.

A etapa de pré-processamento visa o tratamento dos dados obtidos por aquisição e compreende mecanismos de identificação e selecção de pontos para definição do modelo e a eliminação de pontos associados a erros de medição. Esta etapa envolve habitualmente a utilização de modelos de suavização (Spieman *et al*, 2004).

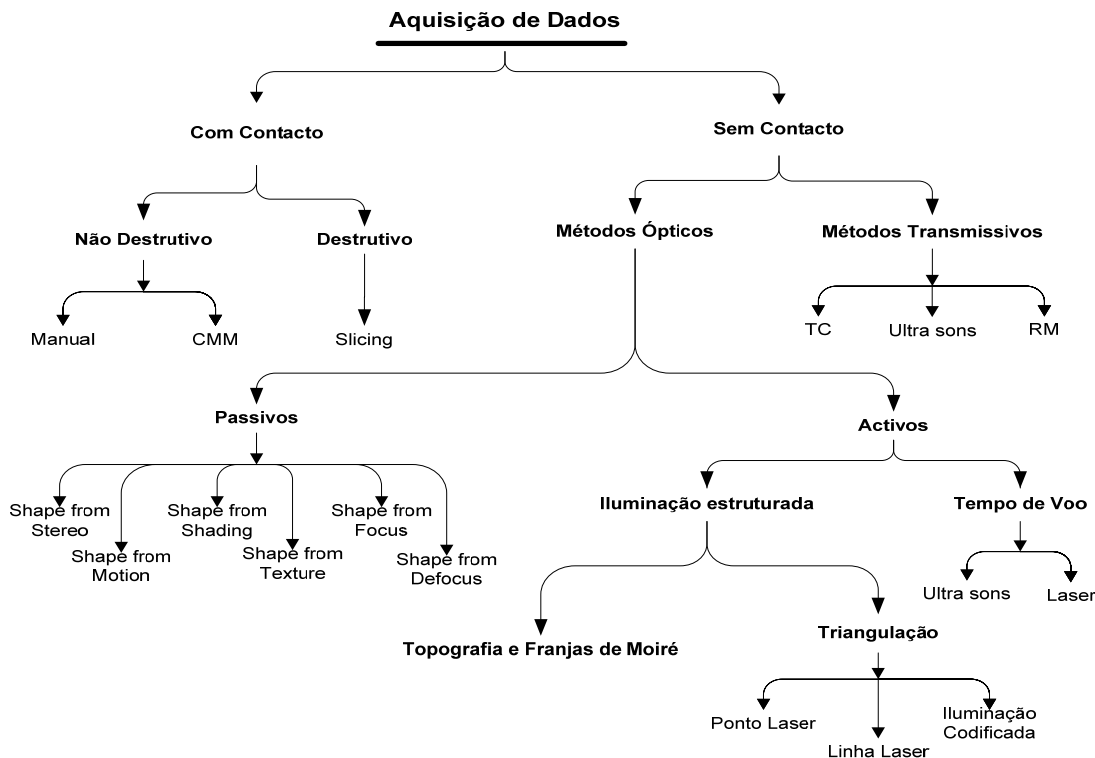


Figura 2.3 - Classificação dos métodos de aquisição de dados (Bibanda et al, 1991)

A etapa de reconstrução 3D tem por objectivo a obtenção de modelos digitais de elevado nível de precisão. Várias estratégias têm sido propostas destacando-se os métodos de *segment-and-fit* e o método baseado em rede de elementos triangulares através da utilização, por exemplo, do algoritmo de triangulação de *Delaunay* (Zhao *et al*, 2005; Hassanpour *et al*, 2004; Kumar *et al*, 1997).

2.2 Métodos de digitalização com contacto físico

2.2.1 Método Manual

O método de medição manual é um método de aquisição de dados não destrutivo, não sendo consensual a sua inclusão como técnica de captação de dados em Engenharia Inversa. Trata-se de um método destinado a operações simples de medição e verificação que utiliza calibradores, escalas e blocos de medição.

2.2.2 Sistemas de Medição por Coordenadas (CMM)




Os sistemas de medição por coordenadas (CMM) são os sistemas de captação de dados digitais mais utilizados em Engenharia Inversa (Bidanda *et al*, 2006). Estes sistemas definem a superfície do objecto usando uma sonda de contacto responsável pela digitalização ponto a ponto da superfície de um objecto (Figura 2.4). Apesar de preciso, este processo de captação de dados digitais apresenta problemas relacionados com a compensação da sonda de contacto e com as baixas taxas de captação de dados, o que limita a sua utilização em situações em que é necessário captar um número elevado de pontos para a definição das superfícies. Quando um ponto está a ser medido, a sonda está normalmente em contacto tangencial com a superfície do objecto (Wozniak *et al*, 2005).

Os sistemas CMM foram introduzidos nos anos de 1960. Desde a sua introdução, têm sofrido diversos avanços em termos de precisão e velocidade de medição. Actualmente existem diferentes configurações (Desai et Bidanda, 2006):

- Sistema tipo ponte,
- Sistema de braço articulado,
- Sistema de braço horizontal,
- Sistema tipo *gantry*,
- Sistema tipo *cantilever*.

As diferentes configurações de um sistema CMM determinam a sua precisão, flexibilidade, tempos de medições, dimensões máxima do objecto a medir e custos. A maioria desta configurações pode ser controlada manualmente ou por computador. Na Tabela 2.1 apresentam-se alguns exemplos de configurações de sistemas CMM e respectivas aplicações.

Tabela 2.1 - Configurações possíveis de sistemas CMM

| Sistema CMM | Aplicações |
|--|--|
|  <p data-bbox="467 840 874 864">Sistema tipo ponte da <i>Wenzel</i> (Wenzel, 2007a)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Digitalização e inspeção de componentes mecânicos complexos, como por exemplo, rodas dentadas, pás de turbinas, etc. • Inspeção de superfícies de formas livres • Inspeção ponto a ponto • Inspeção por varrimento contínuo |
|  <p data-bbox="448 1323 895 1346">Sistema tipo braço articulado (Metalforming, 2003)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Inspeção de zonas de difícil acesso • Medição contínua de superfícies de forma livre • Sistema adequado para grande variedade de aplicações. |
|  <p data-bbox="475 1771 866 1794">Sistema tipo braço horizontal (Coord3, 2007)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Inspeção de objectos de grandes dimensões • Verificação de contornos de objectos que possuem formas livres |



Sistema tipo gantry da Wenzel (Wenzel, 2007b)

- Inspeção de componentes de grandes dimensões
- Medição de componentes de geometria complexa



Sistema tipo cantilever (Coord3, 2007)

- Digitalização e inspeção de objectos com formas livres.
- Operação de marcação de modelos.
- Operações de fresagem.

Os sistemas de CMM são constituídos essencialmente pelos seguintes componentes: estrutura, sonda de medição, sistema de controlo computacional e software de medição. Estes sistemas diferenciam-se quanto ao tipo de controlo utilizado, dimensão, volume/área de trabalho, configuração geométrica e precisão (Globalspec, 2006).

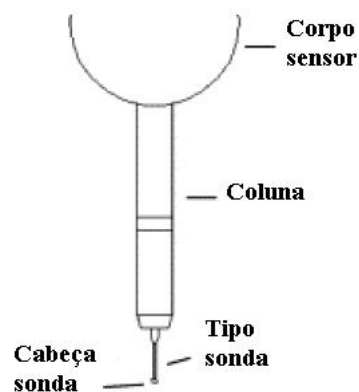


Figura 2.4 - Sonda de contacto de um sistema CMM

A aquisição de dados pode ser executada através de dois modos distintos: manual ou automático. No modo manual, as direcções, x e y, são controladas por um *joystick* sendo necessário um segundo *joystick*, para controlar a direcção z. Contudo, têm vindo a ser desenvolvidas estratégias alternativas (Chen *et al*, 1997), que visam a reconstrução digital a partir de modelos físicos com base num sistema CMM equipado com sonda de contacto e um sistema de visão. Neste sistema os dados obtidos automaticamente pelo sistema de visão são posteriormente refinados usando medições efectuadas pela sonda de contacto da CMM.

Recentemente, (Shen *et al*, 2000, 2001) propôs um sistema de localização e digitalização rápida, através da medição automática por coordenadas baseada em múltiplos sensores. Este sistema é constituído por uma CMM equipada com uma sonda de contacto e um sistema de visão activa 3D. Permanecem contudo limitações quanto à identificação e localização de superfícies de geometria complexa, que em regra necessitam de maior número de pontos digitalizados para uma efectiva reconstrução 3D.

2.2.3 Fatiamento (*Slicing*)

O fatiamento é um método destrutivo de obtenção de geometrias e consiste no corte do objecto a analisar em fatias/camadas de pequena espessura. Em seguida é captada a informação correspondente a cada fatia utilizando-se para este efeito uma grande variedade de técnicas. Deste modo, o objecto físico é reconstruído virtualmente camada a camada (Bibanda *et al*, 1991). Um desenvolvimento recente neste domínio é a Tomografia Computorizada Abrasiva que consiste em digitalizar a forma de um objecto recorrendo à remoção física de material por fresagem, para definição de cada camada e correspondente digitalização através de *scanners* laser e visão computacional (Chang e Chiang, 2003).

2.3 Métodos de Digitalização Sem Contacto Físico

Estes métodos caracterizam-se por não existir contacto entre a peça e o equipamento que realiza a digitalização e classificam-se em (Figura 2.3):

- Métodos transmissivos,
- Métodos reflectivos ou ópticos.

2.3.1 Métodos transmissivos

São métodos em que a digitalização é realizada através da utilização de radiação electromagnética.

2.3.1.1 Tomografia computadorizada (TC)

Após a descoberta dos raios-x por Roentgen em 1895 e até aos anos 1970, grande parte da informação médica era obtida por radiologia através da leitura de imagens radiográficas convencionais, bidimensionais, com densidades determinadas pela projecção e detecção de raios-x sobre o paciente. Estas imagens, ainda hoje amplamente utilizadas, baseiam-se na atenuação que os diferentes tecidos oferecem à passagem dos raios-x. Esta atenuação é traduzida numa película radiográfica por diversos tons numa escala de cinzentos permitindo definir contornos anatómicos (Yang, 2000). Nestas imagens, a percepção do detalhe depende, entre outros factores, da presença de contraste, sendo o limite entre dois órgãos/tecidos tanto mais difícil de perceber quanto menor for a sua diferença em densidades.

A atenuação da intensidade do raio-x incidente (Figura 2.5) é traduzida pela seguinte equação (Kinahan *et al*, 2003):

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu(x)} \quad (2.1)$$

onde x é a distância percorrida pela radiação no interior do corpo, I é a intensidade da radiação após penetrar uma distância x no corpo, I_0 é a intensidade inicial do raio-x e μ é o

coeficiente de atenuação. A medição da atenuação da radiação raio-x é realizada a partir de vários ângulos e posições, donde resulta que (Kinahan *et al*, 2003),

$$\frac{I}{I_o} = e^{-\int_0^P \mu(x) \cdot dx} \Leftrightarrow \ln\left(\frac{I_o}{I}\right) = \int_0^P \mu(x) \cdot dx, x \in [0, P] \quad (2.2)$$

sendo P a espessura do corpo.

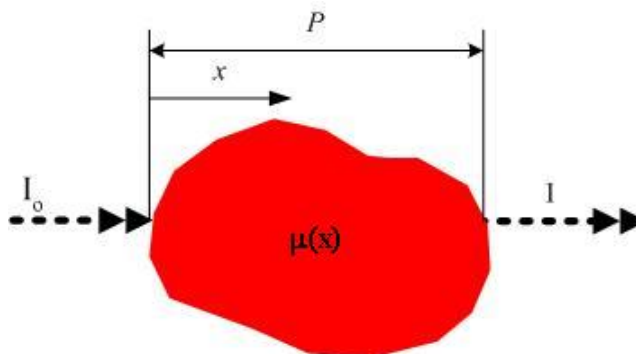


Figura 2.5 - Representação da atenuação do raio-x incidente num corpo genérico

Nos anos 1970, Hounsfield descreveu o processo designado por Tomografia Computorizada (TC) a partir do conceito de radiologia. Esta tecnologia requer a exposição por parte do paciente a pequenas quantidades de raios-x, sendo a absorção da radiação detectada e representada através de um conjunto de imagens 2D (Hounsfield, 1973). O contraste da imagem representa, tal como nas radiografias, diferenças na atenuação dos raios-x. Deste modo, cada imagem é definida através de uma matriz de pixels correspondentes a diferentes tons de cinzento de acordo com os diferentes valores de atenuação registados. A junção das sucessivas imagens 2D permite a criação em computador de representações tridimensionais do objecto em estudo através da definição, a partir de cada unidade pixel, de um elemento de volume designado por *voxel* tal como se indica na Figura 2.6 (Xie *et al*, 2004).

A dimensão de cada pixel é igual à razão entre a região do corte seleccionada pelo operador para recolha de dados e a dimensão da matriz. As imagens obtidas apresentam de forma genérica 12 Bites por pixel, sendo esta informação usada para representar números que vão desde -1000 a 3095 num total de 4096 (2^{12}) valores numa escala de cinzentos. A determinação da densidade das estruturas observadas é determinada a partir da dos coeficientes de atenuação medidos em unidades [Hounsfield] (Hounsfield, 2007) de alguns materiais, Tabela 2.2. De notar que as imagens obtidas necessitam normalmente de

melhoramento de contraste pois os tecidos do corpo humano possuem coeficientes de atenuação bastante próximos. É também necessário corrigir ruídos, isto é, interferências na imagem que a distorcem, desfocam ou alteram as tonalidades de cinzento (Jackson e Thomas, 2004).

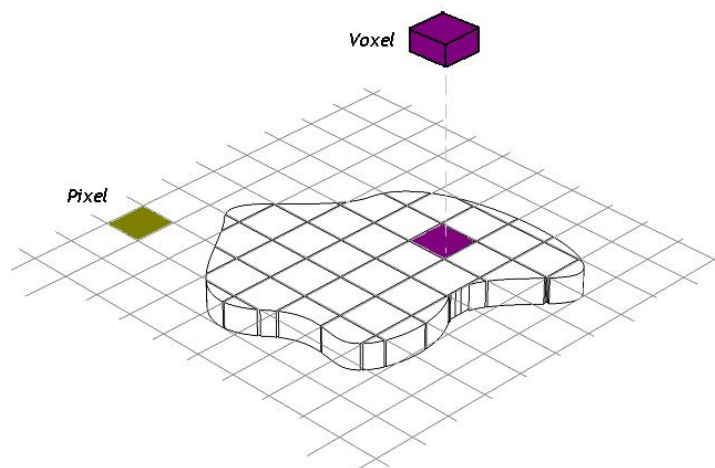


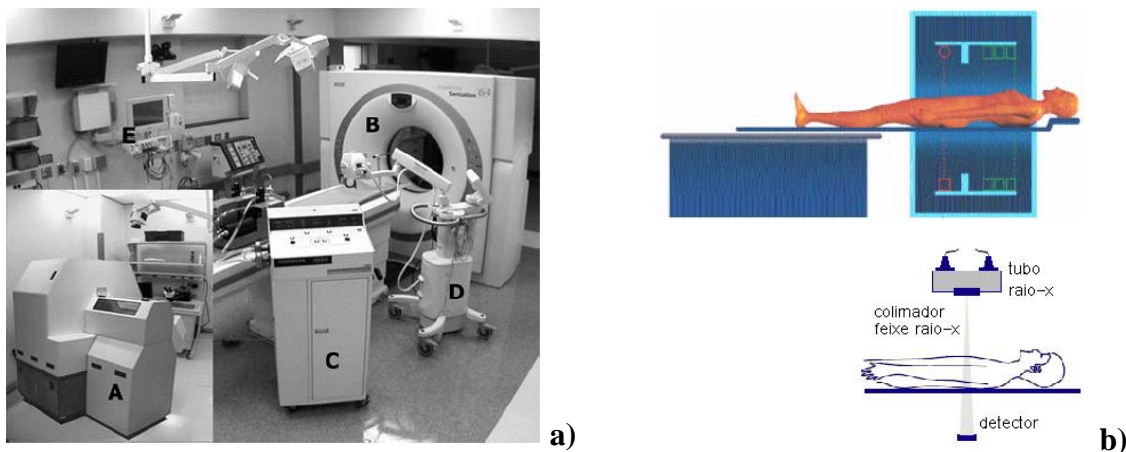
Figura 2.6 - Definição de imagens 3D em tomografia utilizando os conceitos de pixel e voxel

| Tabela 2.2 - Valores típicos medidos tomografia (Jackson e Thomas, 2004) | |
|--|-----------|
| Unidades Hounsfield [HU] | |
| Ar | -1000 |
| Gordura | -110±15 |
| Água | 0 |
| Rim | 35±10 |
| Músculo | 40±10 |
| Fígado | 55±10 |
| Osso poroso | 200 a 400 |
| Osso compacto | >1000 |

Os principais constituintes de um sistema TC (Figura 2.6) são:

- gerador de raios-x (*gantry*),
- sistema de computação,
- consola de operação,
- sistema de registo de imagem.

A *gantry*, componente central do sistema, possui um orifício circular através do qual desliza a mesa em que se encontra o paciente e integra a ampola de raios-x (podem ser igualmente utilizados ultra-sons) com ânodo rotativo de elevada capacidade térmica, o sistema de colimação que determina a espessura dos cortes tomográficos, os detectores de ionização de gás (xénon) os cristais de cintilação (césio ou cádmio) e o motor que faz girar a ampola.


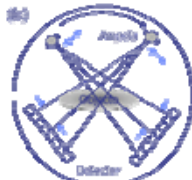




A- Impressora, B- Gantry, C- Consola controlo

Figura 2.7 - a) sistema TC. b) Representação ampola, colimador e detector (Hoffman e Chon, 2005)

Durante os anos 70 começaram a ser utilizados em prática clínica equipamentos de TC designados como de 1ª e 2ª geração, com tempos mínimos de corte da ordem dos 4-5 minutos e 10-20 segundos (Tabela 2.3). Nos anos 1980 desenvolveram-se os chamados equipamentos de 3ª e 4ª geração, permitindo tempos de corte de 1-2 segundos. Em ambos os casos, o leque de feixe de radiação abrange toda a superfície do campo de corte, havendo nos sistemas de 3ª geração, ainda hoje os mais populares, movimento simultâneo da ampola e detectores, ao contrário dos sistemas de 4ª geração em que os detectores estão fixos. Em meados dos anos 1990 foi desenvolvido o sistema de aquisição helicoidal que permite a aquisição volumétrica de toda uma região do corpo através de rotação contínua da ampola (em movimento helicoidal ou espiral) e detectores em torno do paciente. Este método permite a aquisição de imagens num curto espaço de tempo, submetendo o paciente a uma menor dose de raios-X.

Tabela 2.3 - Evolução dos sistemas TC

| Sistema TC | Características | | | | |
|---|--------------------------|-------------------|---------------------|----------|-----------------------|
| | Tempo <i>scan</i> (s) | Dados por 360° | Matriz da imagem | Potência | Espessura de corte |
|  1. ^a geração (1972) | 300 | 57.6 KB | 80x80 | 2 KW | 13mm |
|  2. ^a geração (1980) | 5-10 | 1 MB | 256x256 | 10 KW | 2-10mm |
|  3. ^a geração (1990) | 1-2 | 2 MB | 512x512 | 40 KW | 1-10mm |
|  4. ^a geração (2000) | 0,3-1 | 42 MB | 1024x1024 | 60 KW | 0.5-5mm |

Actualmente existem dois tipos de sistemas de TC:

- TC por transmissão,
- TC por emissão.

Nos sistemas TC por transmissão, a imagem de uma “fatia” do objecto em estudo é reconstruída a partir de uma série de projecções com um feixe de raio-x. A radiação não absorvida é medida por detectores alinhados com os emissores de raios-x. O conjunto emissores-detectores faz a rotação no mesmo plano e os raios são emitidos e medidos para várias inclinações. Os valores medidos na linha de detectores são armazenados para cada

ângulo e usados na reconstrução matemática do plano atravessado pelo feixe de radiação (Chen *et al*, 2001). Como resultado é obtida uma imagem que representa uma fatia plana do objecto em análise sem sobreposições. O conjunto emissor-detector é movido na direcção do eixo de rotação, permitindo a aquisição de planos paralelos consecutivos.

Na TC de Emissão (TCE) o objectivo é, tal como se indica na Figura 2.8, a obtenção de imagens bidimensionais a partir da emissão de radiação electromagnética (emissão de fotões de radiação gama) por acção de isótopos radioactivos administrados ao paciente sob a forma de rádiofarmacos. Como a concentração de um isótopo em qualquer secção muda com o tempo, os dados para construir uma imagem seccional devem ser adquiridos rapidamente para não haver mudanças de concentração. As técnicas TCE compreendem dois processos: Emissão de Positrões (*Positron Emission Tomography* – PET) e Emissão de Fóton Único (*Single Photon Emission Tomography* – SPECT) (Lopez *et al*, 2001).

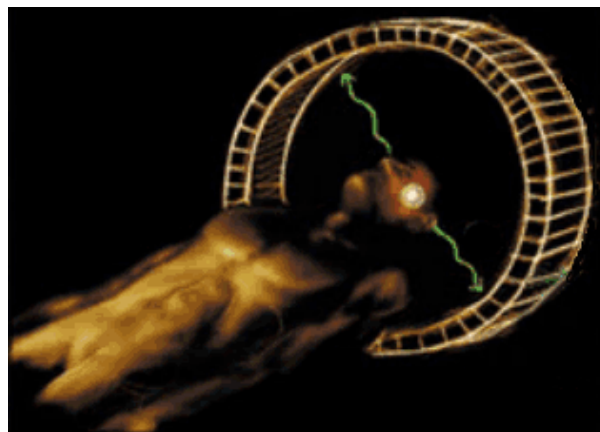


Figura 2.8 - Processo de tomografia por emissão

Actualmente técnicas tomográficas são igualmente utilizadas em aplicações industriais através de sistemas que podem ou não ser portáteis. De notar que os sistemas industriais utilizam níveis de energia mais elevados, permitindo a penetração da radiação em objectos de elevada densidade. Como exemplos de aplicação destacam-se a inspecção dimensional, análise de falhas, micro-roturas e espessuras em peças, verificação de cavidades e estudo de materiais através de processos de microtomografia que permitem espessuras entre camadas de 0.1mm.

Um dos problemas associados à aquisição de dados médicos residia, no passado, na falta de uniformização das imagens médicas. Tal, foi recentemente resolvido pelo *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) e pelo *American College of Radiologists* (ACR) através do estabelecimento de um protocolo de transferência de informação médica

designado por DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) que constitui actualmente o standard de equipamentos médicos, garantindo elevada interoperabilidade entre sistemas (DICOM, 2006).

As principais desvantagens do processo de digitalização por TC são:

- As digitalizações podem ser morosas, sendo o tempo função da geometria da peça a digitalizar, espessura de corte, etc,
- Geração de ficheiros de grandes dimensões,
- Processo de digitalização caro,
- Os algoritmos de reconstrução dos modelos são ainda pouco robustos.

2.3.1.2 Ressonância Magnética (RM)

A Ressonância Magnética (RM) é uma técnica não invasiva de diagnóstico por imagem, que se baseia na interacção entre núcleos de certos elementos, que possuem capacidade de rotação e o campo magnético exterior (Figura 2.9). A RM é atribuída a Block e Purcell em 1946, que lhes permitiu a obtenção do prémio Nobel da Física em 1952. O primeiro protótipo de um sistema de RM foi apresentado em 1975 e as primeiras aplicações clínicas ocorreram no início dos anos 1980. Contudo, os trabalhos de Block e Purcell basearam-se em importantes trabalhos de investigação desenvolvidos nas décadas de 1920 e 1930. No início dos anos 1920, Stern e Gerlach verificaram que um feixe de átomos sujeito a um campo magnético não-homogéneo é desviado de acordo com a orientação dos momentos magnéticos com origem nos electrões. Deste modo, Stern e Gerlach aperfeiçoaram a teoria de Pauli, que em 1924 sugeriu a existência de núcleos magnéticos, permitindo a determinação de momentos magnéticos nucleares. Em 1939, Rabi ao colocar um feixe de moléculas de hidrogénio num campo magnético homogéneo forte, observou que sob acção de ondas de rádio de uma certa frequência, estes feixes moleculares absorviam energia e sofriam um pequeno desvio.

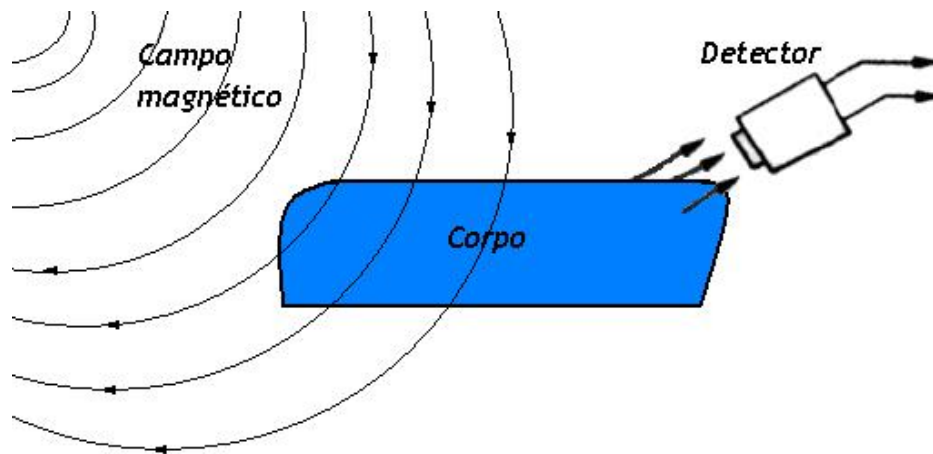


Figura 2.9 – Processo de ressonância magnética

Os tecidos animais, tal com a matéria em geral, são constituídos por átomos que se distribuem em duas camadas: uma camada externa na qual vagueiam os electrões (partículas com cargas negativas) e uma camada mais interna denominada núcleo onde se encontram os prótons (partículas com carga positiva) e neutrões (partículas sem carga). Sempre que o núcleo é formado por um número ímpar de prótons e neutrões, apresenta um movimento de rotação sobre o próprio eixo. Este movimento cria um campo electromagnético cujo vector representativo se denomina de momento magnético. Certos núcleos, como os da água que consiste num só próton ímpar, possuem um número ímpar de prótons, o que permite criar um momento magnético dipolar, permitindo assim o fenómeno de Ressonância Magnética. Existem outros núcleos que possuem idênticas qualidades, tais como o carbono 13 (6 prótons e 7 neutrões), o sódio 23 (11 prótons e 12 neutrões) e o fósforo 31 (15 prótons e 16 neutrões). Devido à sua abundância nos tecidos sob a forma de água ou gordura, associado ao forte momento magnético que possui, o sinal do hidrogénio é cerca de 1000 vezes superior a qualquer dos outros núcleos atómicos com momentos magnéticos semelhantes.

Do ponto de vista médico e dada a quantidade de água e gordura existente no corpo humano, a RM baseia-se no alinhamento dos prótons de átomos de hidrogénio por um forte campo magnético, na aplicação de ondas de rádio para desalinhar os prótons e na consequente emissão ressonante de ondas de rádio quando os prótons voltam a alinhar-se com o campo magnético. Como os tecidos moles são ricos em água, e portanto em prótons, o sinal emitido é especialmente forte nestes casos. Quando submetidos a campos magnéticos muito fortes, a magnetização que os núcleos sofrem em alguns tecidos, poderá ser mais rápida que a sofrida noutro tipo de tecidos. Tecidos diferentes variam igualmente

na sua velocidade de desmagnetização. Deste modo, devido às diferentes velocidades de magnetização e desmagnetização dos tecidos e órgãos do corpo humano, a Ressonância Magnética permite-nos determinar os constituintes destas estruturas. As diferentes velocidades de magnetização e desmagnetização correspondem, nas imagens obtidas por RM, a uma escala de cinzas. Cada pixel branco da imagem corresponde a um sinal de elevada intensidade. As intensidades de sinal nas imagens dependem tipicamente dos seguintes factores:

- Propriedades magnéticas inerentes aos tecidos e que definem o seu tempo de magnetização e desmagnetização. Entende-se por tempo de magnetização, o tempo necessário para que 63% do tecido esteja magnetizado. Entende-se por tempo de desmagnetização o tempo necessário para que um tecido totalmente magnetizado perca 63% da sua magnetização,
- Existência ou não de fluxo de fluidos corporais. As imagens correspondentes a líquidos corporais circulantes são de menor intensidade de sinal. Esta perda de sinal é função da velocidade do fluxo podendo ser, por exemplo, usado para medir débitos sanguíneos,
- Parâmetros utilizados para a realização da imagem.

Na Tabela 2.4 apresentam-se as principais vantagens e desvantagens da RM.

Tabela 2.4 - Principais vantagens e desvantagens da RM

| | Vantagens | Desvantagens |
|--|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Não utiliza radiações ionizantes e actualmente não existem riscos comprovados para o doente ou profissionais de saúde, • Tem grande capacidade de obtenção de imagens com diversos planos, sem necessidade de reposicionamento do paciente e sem perda de qualidade da imagem, • Apresenta grande potencial para a detecção de zonas de hemorragia. | <ul style="list-style-type: none"> • Contra-indicado em doentes com <i>pacemakers</i>, doentes com estruturas ferro-magnéticas no corpo, doentes em estado crítico ou ventilados e para doentes ansiosos e obesos, • Método bastante caro, • Alterações que envolvam calcificação de tecidos podem não ser detectadas. |

2.3.1.3 Ultra-sonografia

A ultra-sonografia consiste na emissão e recepção de ondas sonoras numa determinada frequência acima do limite de audibilidade humana (entre 2.5 a 10 MHz). Neste processo, utilizam-se transdutores de diferentes frequências para a obtenção de imagens (Figura 2.10). De entre as tecnologias de imagiologia médica, os sistemas de ultra-sonografia são os que apresentam menor precisão e maior susceptibilidade de distorções geométricas. O sistema de digitalização utilizado transmite ondas de som e triangulam as coordenadas no espaço 3D usado dispositivos apropriados. Como a velocidade do som depende da pressão atmosférica e temperatura, o desempenho destes sistemas depende grandemente de alterações das condições ambientais do espaço de operação. Estão igualmente bastante sujeitos a interferências provocadas pelo som de máquinas, aparelhos de ar condicionado e

até mesmo de lâmpadas fluorescentes. Trata-se no entanto de um método não invasivo, sem efeitos secundários, flexível, fácil de operar e de baixo custo.

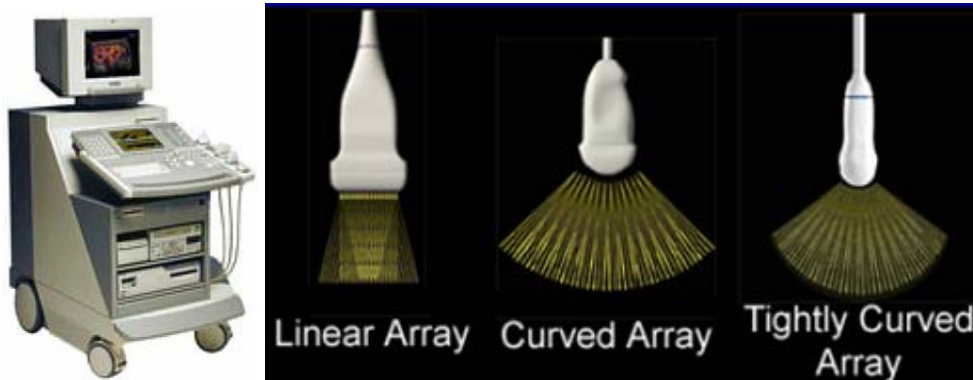


Figura 2.10 - Exemplo de aparelho de ultra-sons e de transdutores

2.3.2 Métodos Ópticos

Os métodos ópticos compreendem duas técnicas fundamentais, segundo Figura 2.3:

- Técnicas activas,
- Técnicas passivas.

As técnicas activas para captação de dados digitais caracterizam-se pela projecção directa e controlada de energia sobre a cena, recorrendo-se a um ou mais emissores e a um ou mais detectores. A energia projectada, geralmente sobre a forma de luz, é reflectida pelos objectos da cena, sendo captada pelos detectores.

As técnicas passivas caracterizam-se por utilizarem apenas a luz ambiente para iluminar a cena, sendo a informação referente à distância do objecto extraída a partir de uma ou mais imagens de intensidade da cena.

2.3.2.1 Técnicas activas

Estas técnicas por sua vez subdividem-se em dois tipos quanto ao método utilizado, projecção de luz controlada e tempo de voo.

2.3.2.1.1 Iluminação estruturada

As técnicas de iluminação estruturada baseiam-se na projecção controlada de luz (um feixe, um plano ou outro padrão de luz) sobre a cena e na captação da luz reflectida pela cena por um sensor (Bidanda *et al*, 1991).

A técnica de iluminação estruturada mais simples, a triangulação, consiste na projecção de um feixe de luz sobre um ponto da cena, através de laser ou iluminação codificada. As coordenadas tridimensionais, uma vez conhecida a posição e orientação do emissor de luz relativamente ao detector, são determinadas por triangulação (Figura 2.11). Deste modo, a determinação da informação tridimensional de toda uma cena implica o varrimento da cena com o feixe luz. Tal procedimento torna este processo numa operação bastante lenta principalmente no tocante a objectos de elevada complexidade.

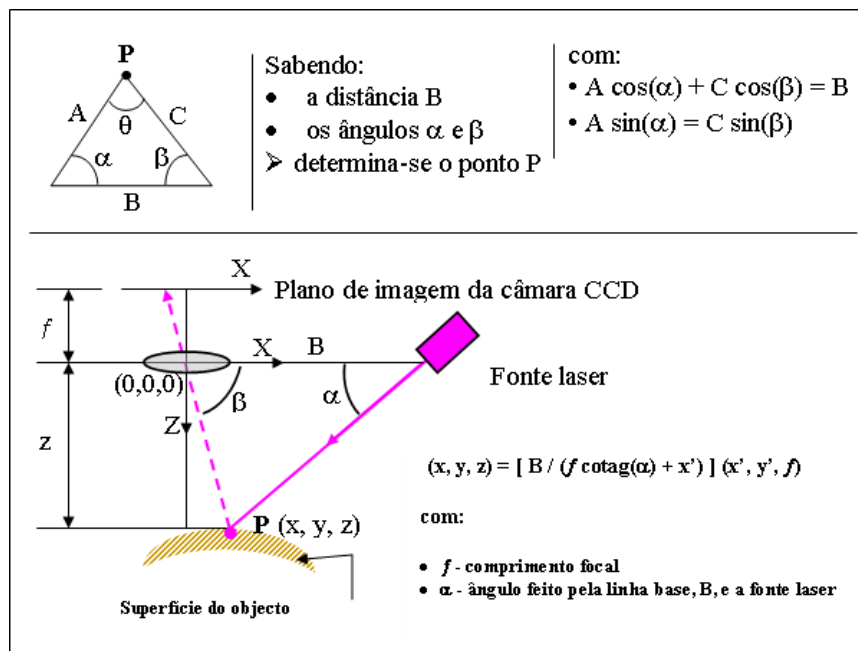


Figura 2.11 - Princípio de triangulação ponto laser

De modo a tornar-se o processo de captação de dados digitais mais expedito, pode proceder-se à projecção de um plano de luz em vez de um feixe (Figura 2.12). Neste caso, por exemplo, uma inflexão na linha indica uma alteração da superfície enquanto uma quebra corresponde a um "gap" entre superfícies. É igualmente possível a projecção sobre a cena de vários planos de luz paralelos ou em grelha. Contudo, neste caso o processo de correspondência entre os pontos projectados e os pontos captados pelo detector é bastante mais complexo.

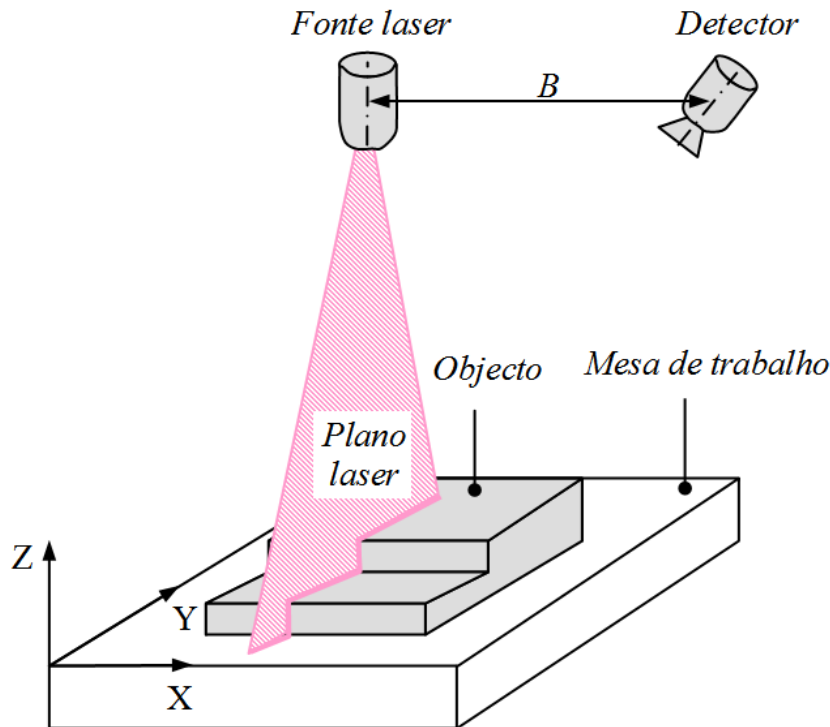


Figura 2.12 - Triangulação por linha laser

As técnicas de iluminação estruturada, particularmente as que envolvem projecção de linha laser, apresentam algumas vantagens relativamente às técnicas por contacto:

- Não existe contacto físico com a superfície dos objectos, podendo por isso mesmo ser utilizado em objectos frágeis ou facilmente deformáveis,
- Podem digitalizar-se objectos de qualquer tipo de material, desde que as suas superfícies sejam, sempre que se justificar, devidamente tratadas,
- Maior rapidez de digitalização (Figura 2.13).

As principais limitações são:

- Menos precisa que a digitalização por sonda de contacto,
- Dificuldade em digitalizar objectos com superfícies não reflectivas. Neste caso, deve proceder-se à “pintura” da superfície do objecto utilizando, por exemplo, um spray branco revelador, utilizado em ensaios de detecção de fendas por líquidos penetrantes, formando-se uma película fina reflectiva,

- Problema com sombras e/ou oclusões características de determinados objectos (Figura 2.14 e Figura 2.15),
- O resultado da digitalização não diferencia os materiais que formam o objecto,
- Impossibilidade de digitalizar superfícies relativas a furos ou cavidades que sejam superiores a uma determinada profundidade e/ou inferiores a um determinado perímetro.

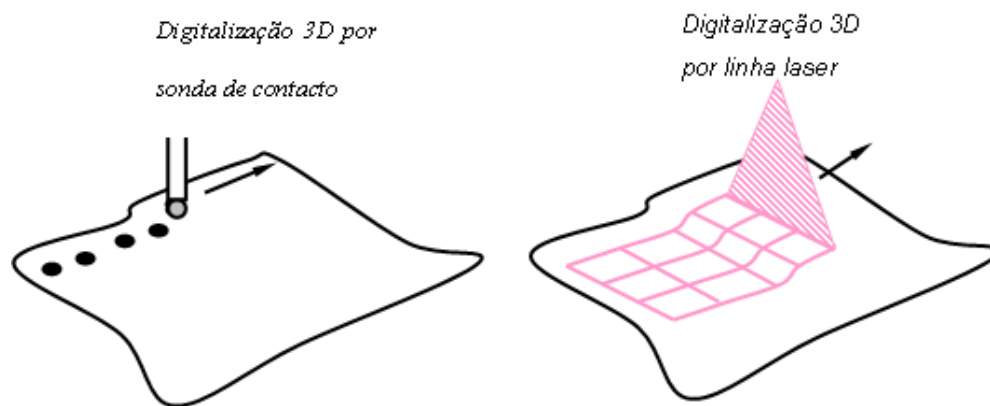


Figura 2.13 - Comparação entre a da digitalização por contacto e a digitalização laser

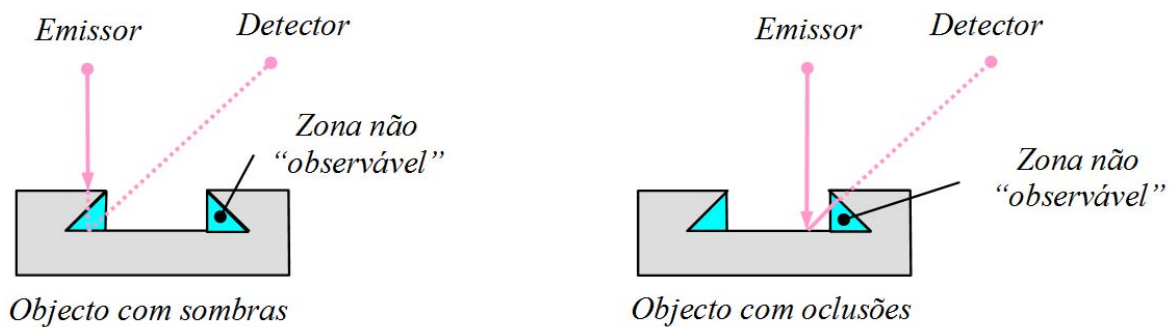


Figura 2.14 - Problema de sombras e oclusões

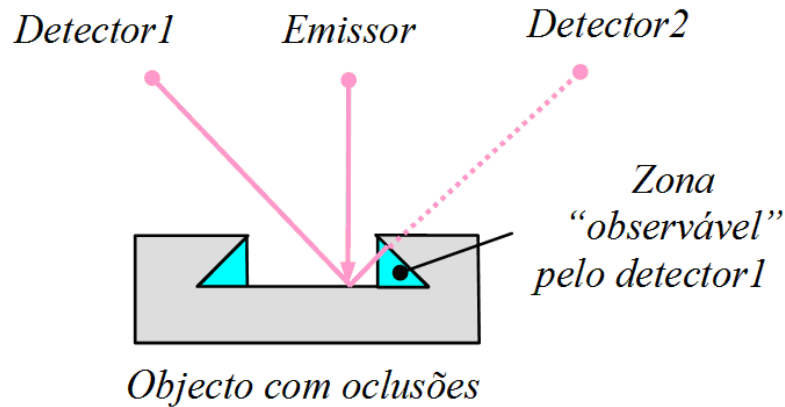


Figura 2.15 - Solução possível para o problema das oclusões

Outra técnica de iluminação estruturada através de triangulação, a iluminação codificada, é uma das técnicas mais utilizadas para a digitalização de objectos e consiste na projecção de padrões de luz sobre o objecto (Figura 2.16). As principais técnicas de projecção de padrões são:

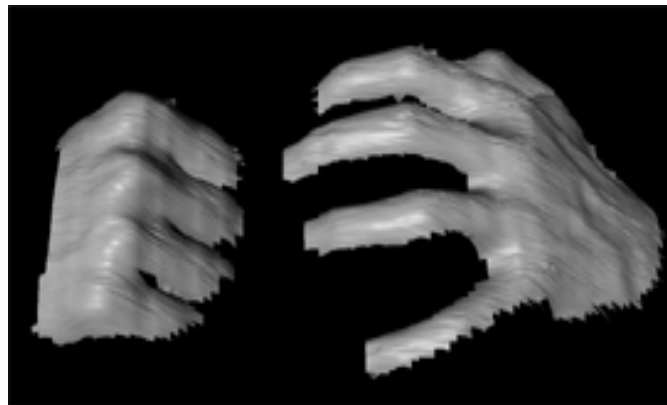
- **Técnica de modulação temporal:** utiliza uma matriz de feixes laser controlados por um obturador (Figura 2.17). Esta matriz corresponde aos planos de bits de um código binário, sendo atribuído a cada feixe um código de binário único. Nesta técnica, cria-se inicialmente uma imagem de referência projectando todos os feixes simultaneamente, projectando-se em seguida os diferentes padrões. O feixe de referência é alterado quando os bits de código valem zero, não sendo alterado quando valem um,



a)



b)



c)

Figura 2.16 - Iluminação codificada. a) Objecto a digitalizar. b) Projecção de padrões. c) Modelo digital

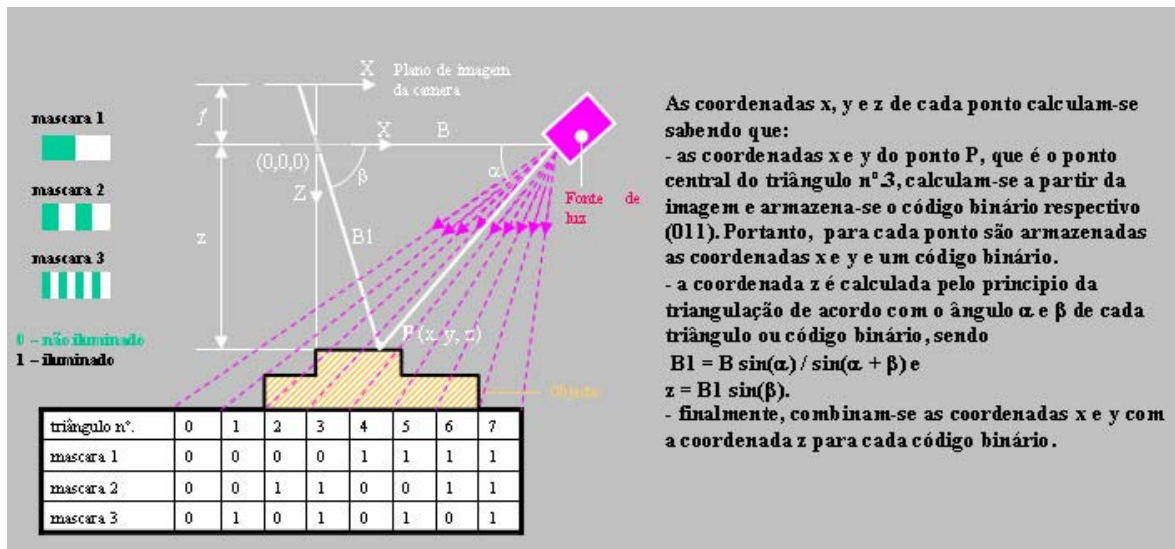


Figura 2.17 - Técnica de modulação temporal

- Técnica de projecção de um padrão binário:** consiste na projecção de um padrão binário constituído por quadrados opacos e transparentes em forma de xadrez, cujos vértices de junção são sobrepostos por outros mais pequenos. Estes pequenos

quadrados, opacos quando representam o código binário zero ou transparentes quando representam o código binário um, são os pontos característicos que se pretende identificar,

- ***Técnica de projecção de um padrão codificado através da cor:*** baseia-se na iluminação da cena através de um único padrão com linhas vermelhas, verdes, azuis e brancas formando conjuntos de quatro linhas. Cada um desses conjuntos é identificado pela sequência de cores presentes no padrão projectado, evitando-se assim ambiguidades.

A técnica de Moiré consiste na projecção de um conjunto de linhas paralelas sobre a cena e na aquisição de uma imagem da mesma, recorrendo a uma câmara deslocada em relação ao projector, em frente da qual está colocada uma grelha idêntica à usada para projectar as linhas. O padrão de Moiré é assim um padrão de interferência formado pela sobreposição de duas grelhas com padrões regularmente espaçados. O resultado é um padrão constituído por franjas alternadamente brilhantes e escuras chamadas franjas de Moiré.

Uma variante desta técnica, designada por sombras de Moiré, usa uma única grelha colocada em frente da cena. Esta grelha define, com os centros de projecção e de aquisição de imagem do sistema, dois conjuntos de planos no espaço. As intersecções destes planos dão origem a superfícies de contorno com forma cilíndrica. Sabendo-se o espaçamento das linhas da grelha projectada, a distância entre o emissor e o detector, a distância do emissor e detector à grelha e o número de ordem da superfície de contorno, é possível determinar a variação de distância entre os pontos de duas franjas consecutivas.

2.3.2.1.2 Tempo de voo ou detecção de ecos

A técnica de tempo de voo ou detecção de erros consiste na determinação de distâncias a partir do tempo de percurso desde que uma fonte de energia, feixe de luz ou ultra-sons é emitida até ser detectada. Existem dois procedimentos para determinar o tempo de percurso:

- **Procedimento 1:** mede-se o tempo que decorre entre a emissão de um impulso de energia e o seu retorno,
- **Procedimento 2:** mede-se o tempo com base na diferença de fase entre um feixe de energia emitido, modulado em amplitude por uma função sinusoidal, e o sinal reflectido.

No primeiro caso, uma vez conhecido o tempo e sabendo-se que a velocidade da luz é de 3×10^8 m/s, podemos determinar a distância emissor-objecto por meio da seguinte equação:

$$\text{Distância (m)} = \frac{1}{2} \times v \text{ (m/s)} \times \text{Tempo (s)} \quad (2.3)$$

$$\text{Distância (m)} = 1.5 \times 10^8 \text{ (m/s)} \times \text{Tempo (s)} \quad (2.4)$$

Recentes desenvolvimentos tecnológicos neste domínio levaram à introdução de novos e eficientes métodos como o *LIDAR*, bastante utilizada em cartografia.

2.3.2.2 Técnicas passivas

As técnicas passivas, designadas genericamente por “forma com base em X” do inglês *shape from X* (*shape from motion*, *shape from stereo*, *shape from texture*, etc.), procuram extrair a informação da distância a partir de uma ou mais imagens obtidas a partir de uma câmara fixa (Figura 2.18).

Das técnicas passivas a mais frequentemente utilizada é a estereoscópio que permite obter informação da distância a partir de duas ou mais imagens da cena, tomadas com uma câmara colocada em posições diferentes. O processo de determinação das coordenadas 3D de um ponto na cena compreende assim três etapas fundamentais:

- Aquisição de duas ou mais imagens através de uma câmara colocada em posições ligeiramente afastadas de modo a garantir que parte da cena a reconstruir seja visível nas duas imagens,
- Estabelecer correspondências entre pontos característicos presentes nas duas imagens que sejam a projecção do mesmo ponto na cena,

- Para cada par de pontos correspondentes determinar o ponto de intersecção das rectas de modo a obter-se as coordenadas do ponto na cena por triangulação (Figura 2.19).

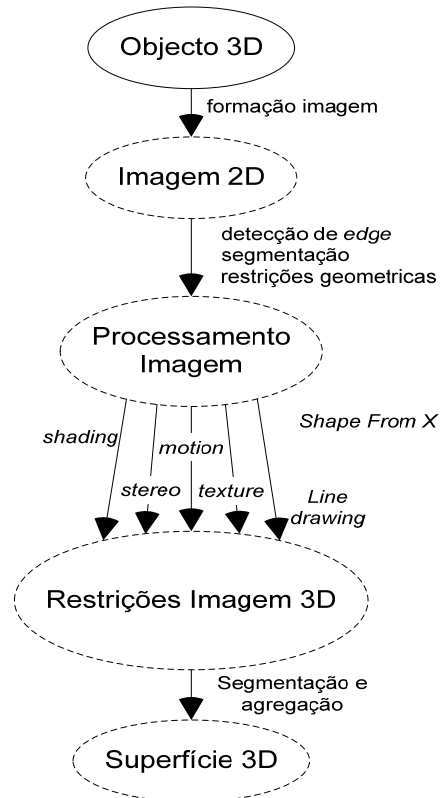


Figura 2.18 - Reconstrução digital usando-se técnicas passivas

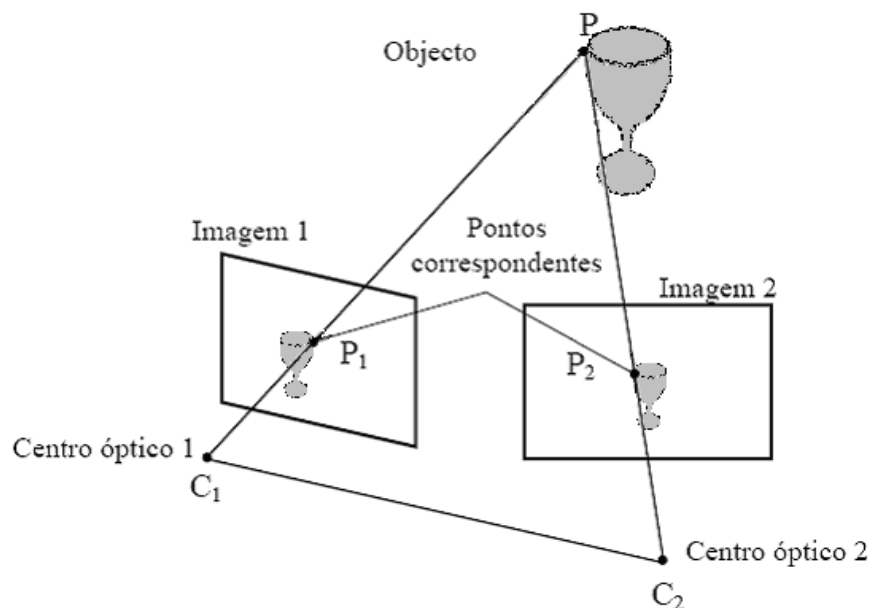


Figura 2.19 – Princípio de triangulação usando duas câmaras

O princípio da triangulação descrito na Figura 2.19, é frequentemente utilizado em cartografia através de processos de fotogrametria. Definida como a tecnologia destinada à reconstrução do espaço tridimensional a partir de imagens bidimensionais da cena, a fotogrametria conheceu um grande desenvolvimento na década de 1970 com o desenvolvimento dos computadores e de técnicas de digitalização de imagens. Os anos 1980 e 1990, caracterizam-se pela utilização de imagens digitais como fonte primária de dados e pelo uso de computadores com capacidade suficiente para o processamento interactivo de imagens digitais e tratamento de um elevado volume de dados, e marcam a era da chamada fotogrametria digital. A imagem digital passou igualmente a poder ser obtida através da digitalização matricial de uma imagem analógica.

2.4 Sumário

Neste capítulo descreve-se o conceito de Engenharia Inversa e as principais técnicas de captação de dados digitais. Apresentam-se igualmente as principais vantagens e limitações dos diferentes processos de captação de dados em Engenharia Inversa. As técnicas de digitalização são aqui classificadas em técnicas com contacto e técnicas sem contacto. Cada técnica envolve um processo de interacção específico com o objecto.

Ao nível dos métodos envolvendo contacto físico descrevem-se técnicas não destrutivas e técnicas destrutivas. Particular destaque é dado aos métodos não destrutivos dada a sua relevância em termos industriais.

As técnicas sem contacto envolvem métodos transmissivos (tomografia, ressonância magnética e ultra-sonografia) e métodos ópticos. Neste último caso descrevem-se técnicas que utilizam apenas a luz ambiente para iluminar a cena, designadas por passivas, e técnicas que utilizam projecção directa e controlada de energia sobre a cena. Particularmente importantes para este trabalho de investigação são as técnicas passivas, que permitem obter informação de distância a partir de uma ou mais imagens captadas por uma câmara. A este nível merece destaque a fotogrametria, bastante relevante no domínio da cartografia, ao permitir uma significativa redução do trabalho de campo de levantamento de coordenadas, mas também por permitirem a reconstrução tridimensional da cena a partir de múltiplas imagens bidimensionais. Quanto maior for o número de fotografias maior será a precisão obtida, mas maior será o tempo de processamento.

A utilização de princípios passivos para a determinação de coordenadas tridimensionais de uma cena a partir de uma única fotografia será tratado no próximo Capítulo. O código desenvolvido compreende ainda alguns procedimentos próprios da visão humana descritos no Capítulo 1.

CAPITULO 3

RECONSTRUÇÃO CAD 3D

3.1 Introdução

A reconstrução tridimensional (3D) de objectos a partir de imagens fotográficas é um processo com grande potencial de aplicação em diferentes domínios de actividade, existindo diversas abordagens para este problema. A primeira a ser desenvolvida foi a abordagem antropomórfica, que visa construir um modelo de visão computacional baseado no modelo humano de visão. Apesar de bastante completa e bem aceite pela comunidade científica, esta abordagem é bastante complexa dada a sobrecarga necessária para se implementar todas as características necessárias. Para além disso o objecto de estudo nem sempre é o directamente obtido pelo modelo de Marr, visto ser um modelo de baixo nível enquanto no sistema de visão há necessidade de se usarem modelos de alto nível. Deste modo, tem-se procurado reduzir o problema de forma a ter-se em conta parâmetros geométricos e morfológicos do objecto em análise, usando-se para tal algoritmos mais simples em termos de nível de abstracção. Esta abordagem é designada por Geométrica/morfológica. Outra abordagem bastante utilizada baseia-se no treino por padrões, na inferência baseada na experiência e à semelhança da abordagem Geométrica, na procura de padrões dos objectos analisados. Neste caso, quem determina as características a serem observadas é o próprio programa, evitando más escolhas do programador.

Neste Capítulo descreve-se um código de reconstrução digital de objectos, usando apenas uma fotografia, baseado no modelo de Marr. A informação gerada pelo código é em seguida utilizada para a criação de um modelo STL através da aproximação das suas superfícies por meio de uma rede de elementos triangulares. Este modelo proporciona um output directo para sistemas de prototipagem rápida, assim como para sistemas de fabrico assistido por computador e engenharia assistida por computador. O código baseia-se num conjunto de algoritmos elaborados em *MatLab*[®] de acordo com o fluxo de informação indicado na Figura 3.1.

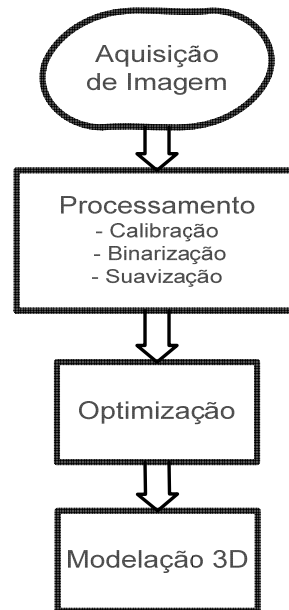


Figura 3.1 - Fluxograma do algoritmo implementado

O código compreende quatro etapas fundamentais (Figura 3.1):

- *Aquisição de imagem* (fase de *Input*),
- *Etapa processamento*, totalmente automática, que compreende as operações de calibração, binarização e suavização.

A operação de calibração (ver secção 3.4.1), visa corrigir as distorções da imagem provocadas pelas imperfeições geométricas e ópticas da lente do equipamento fotográfico ou pelo efeito esférico do plano de imagem.

A binarização automática das imagens de entrada (ver secção 3.4.2), confere versatilidade ao código desenvolvido transformando qualquer imagem, independentemente da sua dimensão e resolução, numa imagem a preto e branco. Esta transformação permitirá uma maior facilidade de processamento dos dados de entrada. Uma vez efectuada a binarização da imagem procede-se à sua suavização e determinação da silhueta 2D (ver secção 3.4.4). Nesta etapa, o operador tem possibilidade de alterar parâmetros, procedendo o código às alterações correspondentes de forma automática.

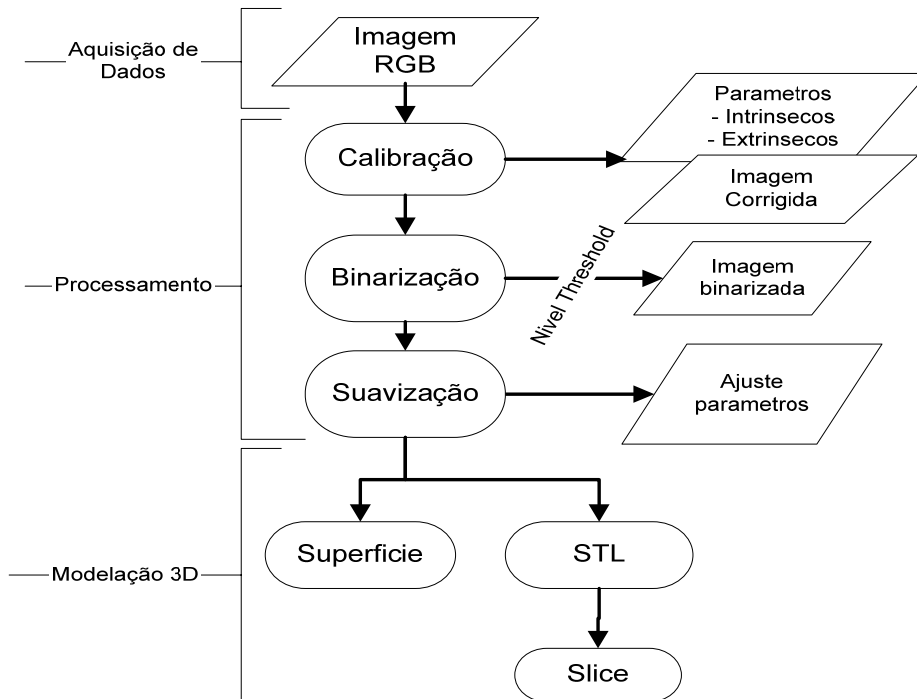


Figura 3.2 – Estrutura do código de reconstrução de objectos digitais desenvolvido

- **Etapa de optimização dos parâmetros de binarização.** Uma vez que os parâmetros obtidos na etapa anterior (etapa de processamento) podem eventualmente não conduzir a resultados óptimos, é possível através desta operação, a visualização das imagens de entrada e respectiva manipulação manual (por exemplo alteração do *threshold*) sendo possível igualmente visualizar o resultado das alterações. Esta operação confere assim ao código desenvolvido maior flexibilidade, permitindo a operação quer em modo automático, quer semi-automático (no caso de se pretender melhorar o resultado final),

- **Etapa de modelação 3D.** Através desta operação é possível a definição de silhuetas, modelos 3D de superfícies (exterior e interior) e modelos 3D em formato STL para posterior reprodução por prototipagem rápida.

3.2 Modelo de Marr

O termo visão computacional foi pela primeira vez introduzido por Marr (Marr, 1982), que relacionou pela primeira vez técnicas computacionais com aspectos da morfofisiologia

humana. A característica mais marcante do modelo de Marr reside no facto da percepção visual ser encarada como um processo hierárquico baseado na expressão, nos circuitos neuronais, de um conjunto de hipóteses sobre categorias relativas à organização do mundo físico. Estes processos interpretativos foram tratados por Marr como “cálculos” correspondentes a operações do tipo computacional, em que as células nervosas isoladas actuam como elementos básicos da rede, portadores da informação. Este domínio de investigação, iniciado por Marr, é hoje designado por neurociência computacional.

De acordo com os trabalhos desenvolvidos no domínio da visão computacional baseados no modelo de Marr é possível considerarem-se dois tipos de sistemas:

- **Sistemas de baixo nível:** para pré-processamento de imagens. O objectivo é fornecer informação aos sistemas de alto nível, baseando-se apenas nas informações obtidas pelo sistema de aquisição de imagens,
- **Sistemas de alto nível:** utiliza informações fornecidas pelos sistemas de alto nível e informações contidas numa base de conhecimento, que pode ser consultada e alterada em função do sistema de visão de baixo nível e das funções pré-estabelecidas pelo sistema.

Esta classificação baseia-se em princípios antropomórficos. Efectivamente, a visão humana divide-se em dois estágios, sendo o primeiro relacionado com as funções realizadas pelo olho humano e a segunda com as funções realizadas pelo cérebro. No seu trabalho, Marr constatou que os olhos realizam uma forma de pré-processamento, seguida de uma compressão de dados que são então transmitidos para o cérebro. A necessidade deste pré-processamento e compressão de informação prende-se com o facto de, segundo Marr, as ligações sinápticas entre o olho e o cérebro não suportarem uma taxa de transmissão suficientemente alta para a transferência de informação não comprimida. Estas operações compreendem:

- Reconhecimento dos contornos dos objectos,
- Senso tridimensional a partir de imagens bidimensionais,
- Extracção de relevos a partir da mudança de luminosidade dos objectos,

- Percepção de movimento.

De acordo com a teoria de Marr, a obtenção computacional de um modelo físico a partir de uma imagem compreende três fases de representação de complexidade crescente (Bianchi, 2001):

- A **primeira fase**, designada por **esboço primário**, compreende a representação das propriedades mais relevantes da imagem bidimensional, como mudanças de intensidade e distribuição e organização geométrica,
- A **segunda fase**, designada por **esboço 2 1/2D**, representa algumas propriedades das superfícies visíveis num sistema de coordenadas centrado no observador. Entre estas propriedades estão a orientação e distância do observador às superfícies visíveis (estimativas), contornos de descontinuidades destas grandezas, reflectância das superfícies e uma descrição aproximada da iluminação,
- A **terceira fase**, designada por **modelo 3D**, representa a estrutura tridimensional e a organização espacial das formas observadas.

3.3 Aquisição de dados

Com o código desenvolvido, pretendeu-se constituir uma ferramenta genérica aplicável a objectos de revolução permitindo a sua reconstrução tridimensional a partir de uma só imagem fotográfica. Por outro lado, o princípio subjacente ao código foi o de permitir a utilização de soluções de baixo custo (máquinas fotográficas digitais de uso comum) sem necessidades de preparação, quer do objecto (não é necessário pintura, uniformização de superfície, etc.), quer do ambiente (não são necessários requisitos especiais de luminosidade, focos de luz especiais, etc.).

O princípio de aquisição de imagem utilizado neste trabalho é idêntico ao utilizado em fotogrametria (ver Capítulo 2), mas utilizando uma única imagem. O sistema básico de aquisição de imagens é composto pelo sistema de lente e pelo sistema de gravação final da imagem, o sensor CCD. A utilização de uma lente e do sistema CCD permite a obtenção de

imagens fotográficas digitais de baixo custo sem necessidade de muitos recursos em termos de pós-processamento.

No CCD matricial os *pixels* são criados por milhares de foto-células microscópicas, que são foto-sensíveis. Em algumas câmaras, que têm somente um CCD, a captura de imagens coloridas é feita utilizando-se uma matriz de filtros RGB (Red, Green e Blue) colocada na frente do CCD. Posteriormente as cores são interpoladas computacionalmente. Alguns modelos de câmaras de vídeo e/ou digitais, embora em número reduzido, possuem três CCD, um para cada cor primária.

A cada tomada fotográfica da câmara digital, gera-se uma imagem bidimensional, no plano do CCD, na qual cada elemento é associado a um tom de cinzento. Trabalhando-se no modo digital, os valores da intensidade do *pixel* são mostrados em dois tons de cinzento.

Nas câmaras digitais, os sensores estão ordenados de forma matricial, isto é, o sistema de coordenadas de tela é solidário aos foto-detectores, possibilitando a mesma orientação ao interior da câmara e à imagem, sem a necessidade de marcas. A partir do sistema de coordenadas da tela pode-se, através de uma transformação, obter as coordenadas de todos os pontos (pixels) no sistema (x, y), tal como se indica na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Imagem real e imagem convertida na forma matricial

A transformação da imagem numa matriz de n linhas por m colunas a 3 cores é designada por discretização da imagem, caracterizando-se cada matriz pela intensidade dos níveis de cor no sistema RGB. Assim cada pixel ($cor_{r, g, b}$, $n(1, \dots, i-1, i)$, $m(1, \dots, i-1, j)$) na matriz indicará a intensidade da respectiva cor (ver Figura 3.4 e Figura 3.5).

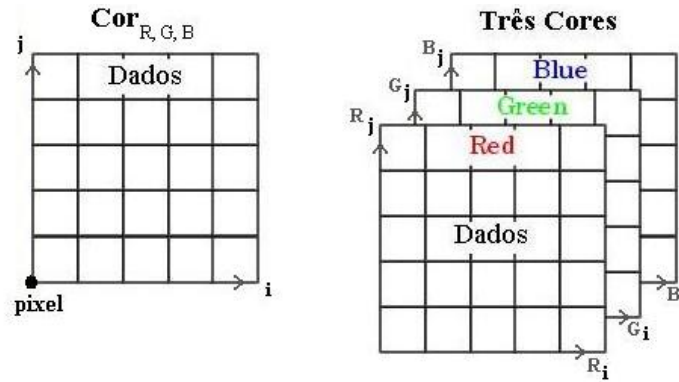


Figura 3.4 - Imagem matriz

Recorrendo ao exemplo da Figura 3.3, é possível representar a intensidade de cada cor numa matriz, cujos valores de intensidade de cada *pixel* estão representados numa escala de cinza (0 a 255) – ver Figura 3.6. A junção destas três matrizes permite a obtenção da imagem digital na escala RGB. Ou seja, qualquer imagem RGB é definida a partir de três matrizes correspondentes a três imagens distintas numa escala de cinzas. Importa igualmente salientar que valores mais baixos na escala de cinzas representam menor incidência da cor no *pixel*. Na Figura 3.7, indica-se como exemplo alguns valores de *pixel* da matriz Red correspondente à imagem apresentada na Figura 3.3.

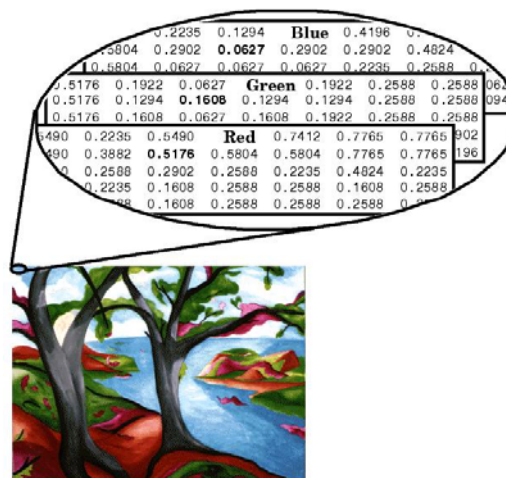


Figura 3.5 - Imagem com as respectivas 3 matrizes bidimensionais (Help Matlab®)

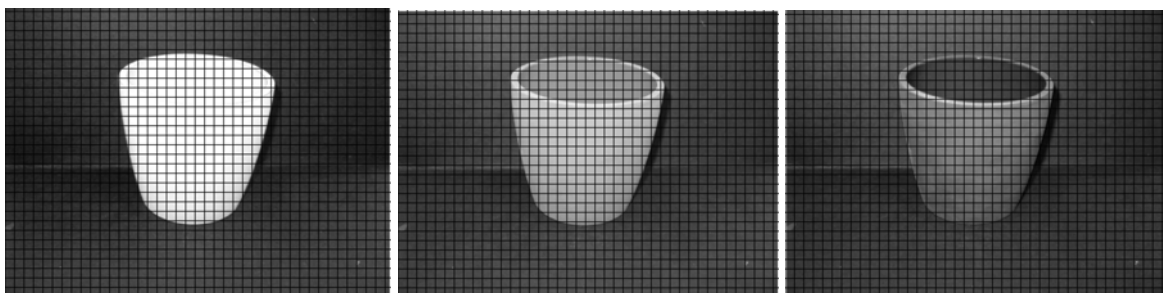


Figura 3.6 - Matrizes R, G e B da imagem digital indicada na Figura 3.2, em níveis de cinza

R =

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 8 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | ⋮ |
| 4 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 4 | ⋮ |
| 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 7 | ⋮ |
| 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 6 | 7 | ⋮ |
| 4 | 3 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 6 | 9 | ⋮ |
| 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 8 | 8 | 7 | ⋮ |
| 6 | 5 | 4 | 5 | 6 | 6 | 8 | 9 | 5 | |
| 7 | 6 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | |
| 7 | 5 | 7 | 6 | 6 | 6 | 4 | 4 | 6 | |
| 6 | 6 | 5 | 4 | 4 | 6 | 5 | 5 | 9 | |

.....

Figura 3.7 - Intensidade R(Red) em alguns pixels(canto sup esq) da imagem indicada na Figura 3.3

3.3.1 Determinação de distâncias a partir de uma imagem fotográfica

A principal técnica de determinação de distâncias absolutas a partir de uma imagem fotográfica é a focagem. Esta técnica (Figura 3.8) consiste no cálculo da distância aos pontos da imagem (r), tendo o conhecimento prévio da distância focal da lente da câmara (f) e da distância entre o centro óptico da lente e o plano de imagem (s), a partir da equação:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{r} + \frac{1}{s} \quad (2.5)$$

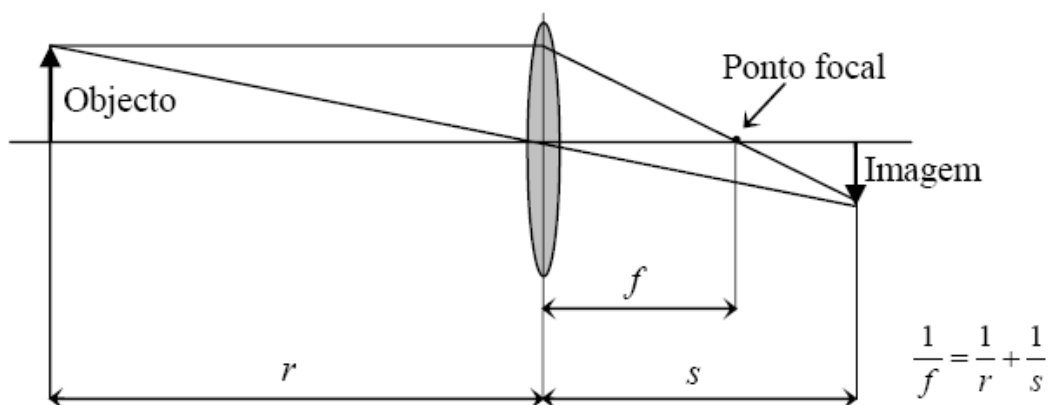


Figura 3.8 - Técnica de focagem

A técnica de focagem é uma técnica cuja precisão diminui com a distância, mas que permite a determinação de distâncias absolutas sem conhecimento prévio da cena. Para

objectos de geometria simples e pequenos ângulos de visão, é possível a determinação de distâncias absolutas conhecendo as dimensões dos objectos da cena e parâmetros geométricos tais como o centro de projecção e a distância focal (Figura 3.9).

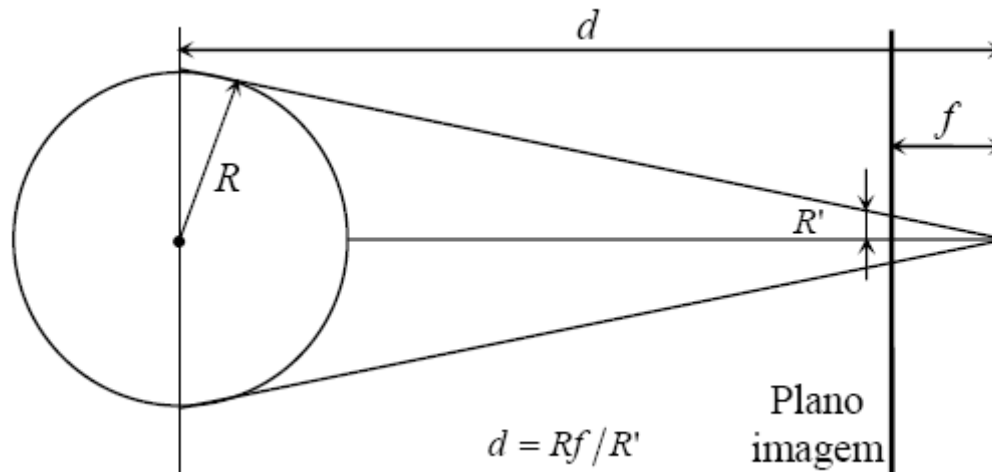


Figura 3.9 - Determinação da distancia absoluta de um objecto esférico a partir do conhecimento da sua geometria

3.4 Processamento

3.4.1 Calibração

A calibração é uma etapa importante sempre que se pretende extrair de imagens fotográficas informação métrica e consiste na determinação de um conjunto de parâmetros designados por intrínsecos e extrínsecos. Os parâmetros intrínsecos ou da câmara (distância focal, centro óptico, constantes de distorção e factores de escala) são aqueles que definem a geometria interna da câmara e as suas características ópticas. Os parâmetros extrínsecos são aqueles que permitem estabelecer uma relação espacial entre a câmara e o objecto, por intermédio de uma transformação entre o sistema de coordenadas do objecto e o sistema de coordenadas da câmara.

A calibração é um importante domínio de investigação e compreende as seguintes técnicas:

- **Técnicas lineares:** são as técnicas mais simples e que requerem menor esforço computacional. No entanto, não são aplicáveis em soluções que requerem uma precisão elevada ou a modelação da distorção da lente da câmara. Estas técnicas utilizam, por exemplo, o método dos mínimos quadrados para determinar a matriz de transformação que relaciona as coordenadas 3D mundo com as suas projecções 2D imagem. Dado tratar-se de uma técnica de calibração implícita, torna-se por vezes difícil extrair parâmetros dessa matriz (Faugeras, 1986),
- **Técnicas de optimização não lineares:** são técnicas que utilizam sistemas não lineares para a estimação de um ou mais parâmetros da câmara. Estes parâmetros são normalmente determinados de modo iterativo com uma restrição de minimização para uma determinada função. Esta função a minimizar é em regra a distância entre os pontos da imagem e as projecções obtidas iterativamente,
- **Técnicas híbridas:** combinando princípios característicos de técnicas lineares e de optimização não linear.

Não sendo objectivo deste trabalho de investigação o desenvolvimento de um algoritmo de calibração, seleccionou-se o algoritmo desenvolvido por Zhang (*Zhang, 2002*), dada a sua simplicidade, robustez e flexibilidade (Figura 3.8). Trata-se de um algoritmo baseado no conhecimento preciso sobre um objecto padrão possuindo uma superfície planar, usado para determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos de uma câmara através da realização de diversas observações fotográficas do padrão segundo distintas direcções. Esta secção descreve com detalhe o formalismo adoptado por este método de calibração. O procedimento adoptado compreende as seguintes etapas:

- Preparação do padrão,
- Obtenção de um conjunto de imagens do padrão sob diferentes orientações,
- Identificação de pontos característicos na imagem,
- Determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos,

- Determinação dos parâmetros de distorção radial por otimização (mínimos quadrados),
- Obtenção de todos os parâmetros para calibração por minimização.

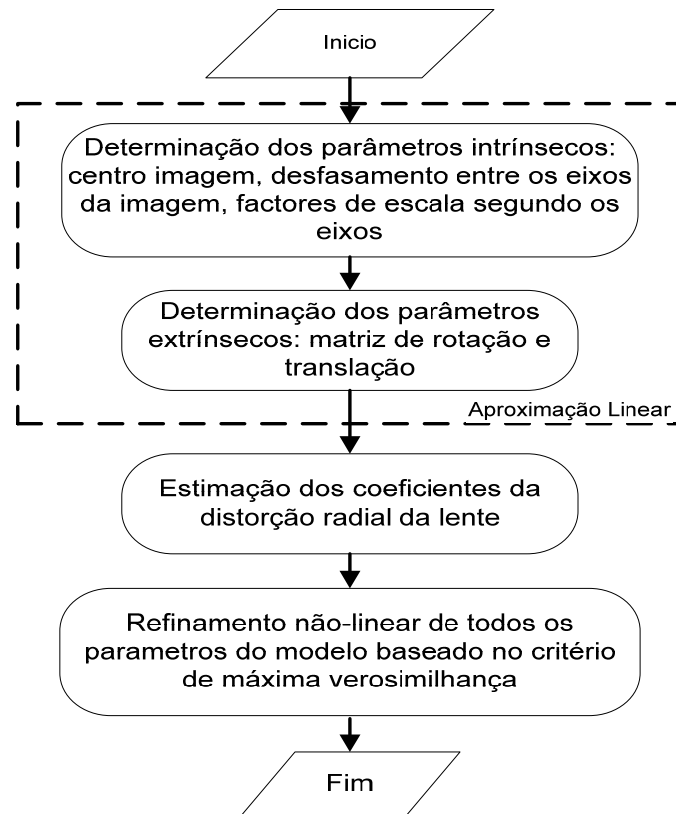


Figura 3.10 - Método de calibração proposto por Zhang

3.4.1.1 Considerações geométricas

De acordo com o método de calibração adoptado (Figura 3.11), considere-se um ponto genérico num plano 2D representando por $m = [v, u]^T$, com u e v as coordenadas cartesianas do plano, e M um ponto genérico no espaço 3D representando por $M = [X, Y, Z]^T$ com X , Y , e Z as suas coordenadas cartesianas.

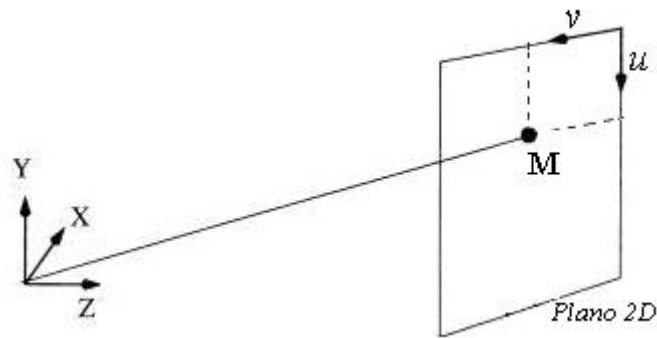


Figura 3.11 - Princípio de calibração

Usando-se um sistema de coordenadas homogêneas, baseado nas características de uma câmara *pinhole*, passamos a descrever m e M através de $m^h = [v, u, 1]^T$ e $M^h = [X, Y, Z, 1]^T$, sendo a relação de um ponto 3D genérico M , com a sua imagem projectada, m , é dada por:

$$s \cdot m^h = A \cdot [R \ t] \cdot M^h \quad (3.1)$$

Onde s é um factor de escala e (R, t) são os parâmetros extrínsecos, respectivamente rotação e translação, que relacionam o sistema de coordenadas do mundo tridimensional físico (sistema de coordenadas global) com o sistema de coordenadas da câmara. Considere-se igualmente a matriz dos parâmetros intrínsecos da câmara dada por:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Onde (u_0, v_0) são as coordenadas do ponto principal, α e β são os factores de escala da imagem segundo os eixos u e v , e γ é o parâmetro que descreve a distorção dos eixos. De notar que:

$$A^{-T} = (A^{-1})^T = (A^T)^{-1} \quad (3.3)$$

Sem perda de generalidade, podemos assumir que o plano da imagem está no plano $Z = 0$ do mundo, pelo que o ponto genérico M é dado por:

$$M = [X, Y, 0]^T \quad (3.4)$$

Designando r_i como a i -ésima coluna da matriz de rotação R a equação (3.1) passa a ser dada por:

$$s \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

e,

$$s \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Por questão de simplicidade, e dado que $Z=0$, o ponto M passará a ser descrito por,

$$M = [X, Y]^T \quad (3.7)$$

Por outro lado,

$$M^0 = [X, Y, 1]^T \quad (3.8)$$

O ponto genérico M e a sua imagem m é relacionada pela homografia H de acordo com a seguinte equação:

$$s \cdot m^0 = H \cdot M^0 \quad (3.9)$$

com

$$H = A \cdot \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Na equação anterior a matriz H é definida de acordo com um factor escala, podendo ser descrita,

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad h_3] \quad (3.11)$$

em que h_i com $i = 1,2,3$, representa as constantes homogéneas. Substituindo na equação (3.2) obtém-se:

$$[h_1 \quad h_2 \quad h_3] = \lambda \cdot A \cdot \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

onde λ é um factor escala.

Sabendo que r_1 e r_2 são ortogonais temos que:

$$h_1^T \cdot A^{-T} \cdot A^{-1} \cdot h_2 = 0 \quad (3.13)$$

$$h_1^T \cdot A^{-T} \cdot A^{-1} \cdot h_1 = h_2^T \cdot A^{-T} \cdot A^{-1} \cdot h_2 \quad (3.14)$$

que constituem as restrições dos parâmetros intrínsecos. Uma vez que a homografia tem 8 graus de liberdade e 6 parâmetros extrínsecos (3 de rotação e 3 de translação), apenas

podemos obter 2 restrições dos parâmetros intrínsecos. De notar ainda que $A^{-T} \cdot A^{-1}$ descreve a imagem de uma cónica perfeita (Luong e Faugeras, 1997).

Relacionando as equações (3.13) e (3.14) na cónica perfeita é possível demonstrar-se que, nesta notação, o plano do objecto modelo é descrito no sistema de coordenadas da câmara através de:

$$\begin{bmatrix} r_3 \\ r_3^T \cdot t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = 0 \quad (3.15)$$

com $w=0$ para pontos no infinito e $w=1$ para os outros. Este plano intercepta-se com o plano no infinito resultando numa linha. Podemos igualmente verificar que $\begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \end{bmatrix}$ e $\begin{bmatrix} r_2 \\ 0 \end{bmatrix}$ são dois pontos particulares dessa linha. Por outro lado, qualquer ponto dessa linha é uma combinação linear destes dois pontos, pelo que se obtém a seguinte relação:

$$x_\infty = a \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \end{bmatrix} + b \cdot \begin{bmatrix} r_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot r_1 + b \cdot r_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde x_∞ é um ponto designado por ponto circular se satisfizer a relação $x_\infty^T \cdot x_\infty = 0$, ou seja,

$$x_\infty = a \cdot \begin{bmatrix} r_1 \pm i r_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

deste modo a projecção no plano da imagem é dado, a menos de um factor escala, por:

$$i\%_\infty = A \cdot (r_1 \pm i r_2) = h_1 \pm i h_2 \quad (3.18)$$

Na equação anterior $i\%_\infty$ é imagem na cónica perfeita, através $A^{-T} \cdot A^{-1}$ (Luong e Faugeras, 1997), pelo que se têm que:

$$(h_1 \pm i h_2)^T \cdot A^{-T} \cdot A^{-1} \cdot (h_1 \pm i h_2) = 0 \quad (3.19)$$

Importa realçar ser necessário que, quer as partes real e imaginaria das expressões (3.13) e (3.14) sejam zero.

Considere-se uma matriz B definida a partir da matriz dos parâmetros intrínsecos:

$$B = A^{-T} \cdot A^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2 \cdot \beta} & \frac{v_0 \cdot \gamma - u_0 \cdot \beta}{\alpha^2 \cdot \beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2 \cdot \beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2 \cdot \beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma \cdot (v_0 \cdot \gamma - u_0 \cdot \beta)}{\alpha^2 \cdot \beta^2} - \frac{u_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0 \cdot \gamma - u_0 \cdot \beta}{\alpha^2 \cdot \beta} & -\frac{\gamma \cdot (v_0 \cdot \gamma - u_0 \cdot \beta)}{\alpha^2 \cdot \beta^2} - \frac{u_0}{\beta^2} & \frac{(v_0 \cdot \gamma - u_0 \cdot \beta)^2}{\alpha^2 \cdot \beta^2} + \frac{u_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Esta matriz é simétrica e definida por um vector 6D:

$$b = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{23}, B_{33}]^T \quad (3.22)$$

Designando a i -ésima coluna do vector H como,

$$h_i = [h_1, h_2, h_3]^T \quad (3.23)$$

temos que,

$$h_i^T \cdot B \cdot h_j = v_{ij}^T \cdot b \quad (3.24)$$

com,

$$v_{ij} = [h_1 h_{j1}, h_1 h_{j2} + h_{i2} h_{j1}, h_2 h_{j2}, h_3 h_{j1} + h_{i1} h_{j3}, h_3 h_{j2} + h_{i2} h_{j3}, h_3 h_{j3}]^T \quad (3.25)$$

Deste modo, os dois constrangimentos fundamentais dados por meio das equações (3.13) e (3.14), para uma dada homografia, podem ser rescritas como duas equações homogéneas em b de acordo com a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} \cdot b = 0 \quad (3.26)$$

Se forem observadas n imagens do objecto então teremos n equações do tipo (3.26), pelo que,

$$V \cdot b = 0 \quad (3.27)$$

onde V é uma matriz de $2n \times 6$. Se $n \geq 3$ teremos uma única solução b a menos de um factor de escala.

Se $n = 2$, então deve ser imposta uma restrição de distorção $\gamma = 0$, isto é, $[0, 1, 0, 0, 0, 0] \cdot b = 0$, que constitui uma equação adicional à equação (3.26).

Se $n = 1$ apenas podemos obter dois dos parâmetros intrínsecos da câmara, isto é, α e β assumindo que u_0 e v_0 são conhecidos e $\gamma = 0$.

Uma vez determinado b é possível obter todos os parâmetros intrínsecos da câmara (matriz A), e em seguida os parâmetros extrínsecos de cada imagem. De (3.10) obtém-se:

$$\begin{aligned} r_1 &= \lambda \cdot A^{-1} \cdot h_1 \\ r_2 &= \lambda \cdot A^{-1} \cdot h_2 \\ r_3 &= \lambda \cdot A^{-1} \cdot h_3 \\ t &= \lambda \cdot A^{-1} \cdot h_3 \end{aligned} \quad (3.28)$$

com,

$$\lambda = \frac{1}{\|A^{-1} \cdot h_1\|} = \frac{1}{\|A^{-1} \cdot h_2\|} \quad (3.29)$$

Devido ao ruído existente, a matriz $R = [r_1, r_2, r_3]$ não satisfaz totalmente as propriedades de uma matriz rotação. A solução anterior é obtida por optimização de distâncias algébricas. Para tal considerem-se n imagens do plano do modelo contendo m pontos genéricos. Assumindo que os pontos das imagens estão corrompidas por ruído considere-se a minimização do seguinte funcional:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| m_{ij} - \hat{m}(A, R_i, t_i, M_j) \right\|^2 \quad (3.30)$$

onde $\hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)$ é a projecção do ponto M_j na imagem i de acordo com a equação(3.10). Deste modo a matriz rotação R , é parametrizada por um vector de 3 parâmetros, designado por r , paralelo ao eixo de rotação e cuja magnitude é igual ao ângulo de rotação. R e r são relacionados de acordo com o modelo de Rodrigues (Faugeras, 1993). A minimização da equação (3.27) é um problema de minimização não-linear, resolvido através do algoritmo de Levenberg-Marquardt, que requer valores iniciais de A , $\{R_i, t | i=1, \dots, n\}$.

Importa igualmente considerar as distorções das imagens, dado que as câmaras digitais de baixo custo apresentam elevados níveis de distorção radial. Deste modo, o processamento de imagens fotográficas para reconstrução tridimensional de objectos da cena requer sempre a correcção de distorções que podem ser lineares ou não lineares, tal como se indica na Figura 3.10 (Lucchese, 2005). As principais distorções, não dependentes de qualquer problema de fabrico, são distorções radiais associadas às características das lentes das câmaras fotográficas. As distorções tangenciais podem ser desprezadas tal como foi demonstrado por (Alves, 2006) e (Zhang , 2002). As distorções radiais, consideradas neste trabalho, são distorções simétricas que se caracterizam por um efeito de expansão ou contracção da imagem relativamente à imagem ideal tal como se indica na Figura 3.13. As distorções lineares, não são consideradas neste trabalho, uma vez que para a câmara utilizada (ver Capítulo 4) não são significativas podendo ser desprezadas quando comparadas com as distorções radiais (Zhang, 2002).

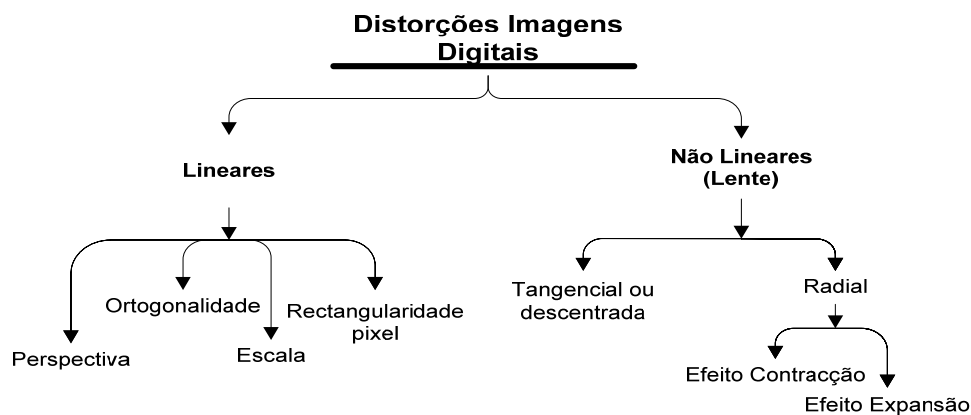


Figura 3.12 - Principais distorções em imagens lineares

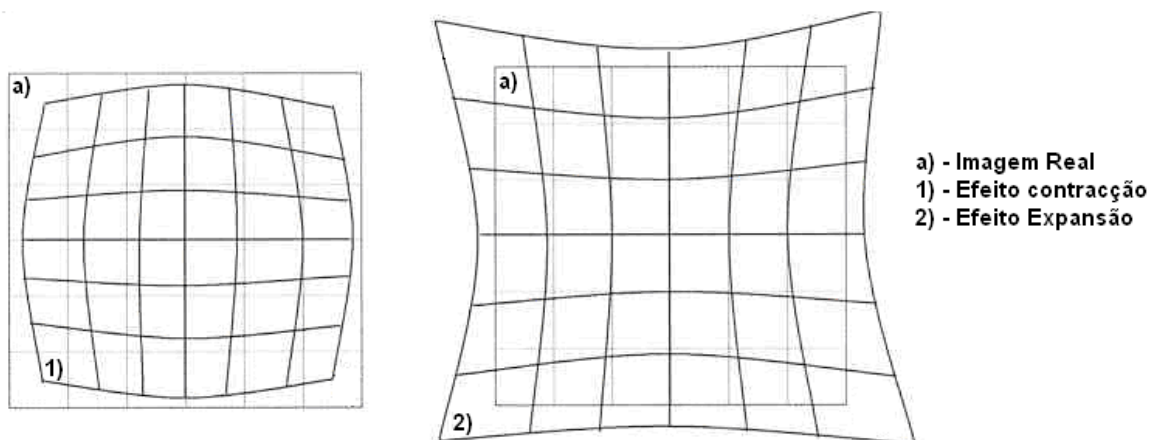


Figura 3.13 - Distorções radiais

No modelo adoptado consideram-se apenas os primeiros dois termos da distorção radial. Seja (u, v) as coordenadas de um ponto ideal (livre de distorção radial) e (\hat{u}, \hat{v}) as coordenadas correspondentes do ponto real (com distorção radial). De acordo com as características de uma câmara *pinhole* as coordenadas projectadas do ponto ideal sem distorção radial, designadas por (x, y) , e as coordenadas projectadas do ponto ideal com distorção radial designadas por (\hat{x}, \hat{y}) relacionam-se entre si por meio da seguinte relação (Brown, 1971; Wei e Ma, 1993):

$$\begin{cases} \hat{x} = x + x \cdot \left[k_1 \cdot (x^2 + y^2) + k_2 \cdot (x^2 + y^2)^2 \right] \\ \hat{y} = y + y \cdot \left[k_1 \cdot (x^2 + y^2) + k_2 \cdot (x^2 + y^2)^2 \right] \end{cases} \quad (3.31)$$

onde k_1 e k_2 são os coeficientes da distorção radial. O centro da distorção radial coincide com o ponto principal. De

$$\begin{cases} \hat{u} = u_0 + \alpha \cdot \hat{x} \\ \hat{v} = v_0 + \beta \cdot \hat{x} + c \cdot \hat{y} \end{cases} \quad (3.32)$$

tem-se que:

$$\begin{cases} \hat{u} = u + (u - u_0) \cdot \left[k_1 \cdot (x^2 + y^2) + k_2 \cdot (x^2 + y^2)^2 \right] \\ \hat{v} = v + (v - v_0) \cdot \left[k_1 \cdot (x^2 + y^2) + k_2 \cdot (x^2 + y^2)^2 \right] \end{cases} \quad (3.33)$$

Para resolução das equações anteriores é necessário determinar k_1 e k_2 , através de:

$$\begin{bmatrix} (u - u_0) \cdot (x^2 + y^2) & (u - u_0) \cdot (x^2 + y^2)^2 \\ (v - v_0) \cdot (x^2 + y^2) & (v - v_0) \cdot (x^2 + y^2)^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{u} - u \\ \hat{v} - v \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Dados m pontos de n imagens conseguimos emparelhar as equações e obter $2mn$ equações, na forma de matriz

$$D \cdot k = d \quad (3.35)$$

onde

$$k = [k_1, k_2]^T \quad (3.36)$$

cuja solução, obtida através dos mínimos quadrados é dada por:

$$k = (D^T \cdot d)^{-1} \cdot D^T \cdot d \quad (3.37)$$

O processo de determinação de k_1 e k_2 pode ser refinado através da equação (3.34) com $\hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)$.

O processo de convergência na determinação destes parâmetros é no entanto lento. Como tal, uma extensão natural à equação (3.1) consiste em determinar o conjunto completo de parâmetros por minimização do seguinte funcional:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| m_{ij} - \hat{m}(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j) \right\|^2 \quad (3.38)$$

onde $\hat{m}(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)$ é a projecção do ponto M_j na imagem i de acordo com a equação (3.10), seguida da distorção definida por (3.31) e (3.34). Trata-se pois de um problema de minimização não-linear cuja resolução passa pela utilização do algoritmo de Levenberg-Marquardt.

3.4.2 Binarização

As imagens digitais raramente possuem boa qualidade, sendo em geral irregulares devido a elementos de ruído. Para se melhorar a qualidade das imagens é necessário proceder-se à sua binarização (threshold). Nesta operação a matriz da imagem calibrada composta por três níveis de cor, formato RGB, é transformada numa imagem em tons de preto e branco. Através de um algoritmo adequado são analisados os histogramas dos três níveis de cor em simultâneo e é definido um nível (limite) a partir de qual, por comparação com o valor do nível de cinza do pixel, o valor do pixel correspondente para a nova imagem monocromática é atribuído a nível 1 ou 0, respectivamente branco e preto, obtendo deste modo uma imagem binária.

O algoritmo estabelece automaticamente e de modo iterativo, um nível global de threshold para a imagem, que será utilizada para converter a imagem, isto é possível através da implementação do método de *Otsu*, que define o valor através da avaliação da variância entre preto e branco, isto é, esse valor é encontrado de forma a que a variância entre os níveis de preto e branco seja máxima.

Assim, o método maximiza *à posteriori* a variância entre-classes, classe preto e classe branco, $\sigma_B^2(t)$, sendo esta definida por, (*Otsu* 1979),

$$\sigma_B^2(t) = w_0(t) \cdot w_1(t) \cdot [\mu_1(t) - \mu_0(t)]^2 \quad (3.39)$$

ou reduzindo assume a expressão,

$$\sigma_B^2(t) = w_0(t) \cdot [1 - w_0(t)] \cdot \left[\frac{\mu_T - \mu_1(t)}{1 - w_0(t)} - \frac{\mu_1(t)}{w_0(t)} \right]^2 \quad (3.40)$$

em que,

$$w_0(t) = \sum_{i=0}^t \frac{n_i}{N} \quad (3.41)$$

$$w_1(t) = 1 - w_0(t) \quad (3.42)$$

$$\mu_1(t) = \sum_{i=0}^t i \cdot \frac{n_i}{N} \quad (3.43)$$

$$\mu_T(t) = \sum_{i=0}^{L-1} i \cdot \frac{n_i}{N} \quad (3.44)$$

onde n_i representa o número de *pixels* com nível de cinza i , L é o número de níveis de cinza, N é o número total de *pixels* da imagem.

O *threshold* óptimo é encontrado através de iterações de forma a maximizar a variância, $\sigma_B^2(t)$, para valores de t com $0 \leq t \leq L$. A arquitectura do algoritmo de *Otsu* pode ser dividida em 3 módulos conforme Figura 3.14.

No primeiro módulo, a informação dos histogramas e a intensidade dos níveis dos *pixels* da imagem são utilizados para calcular e armazenar os valores de $w_0(t)$, frequência relativa, e de $\mu_1(t)$ frequência relativa ponderada, para os L níveis de cinzento. O valor óptimo de *threshold*, t^* , é calculado computacionalmente de forma iterativa por comparação, de forma a maximizar $\sigma_B^2(t^*)$.

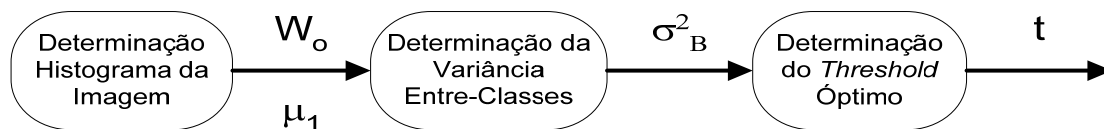


Figura 3.14 - Módulos computacionais da arquitectura de *Otsu*

Na Figura 3.15, apresenta-se um exemplo de aplicação deste algoritmo a alguns objectos considerados neste trabalho. A imagem original obtida através de uma máquina digital familiar (HP 850), com dimensões de 480 x 640 *pixels* tricolor, é indicada na Figura 3.15a. Para esta imagem, o histograma revela a distribuição dos níveis de cinza dos *pixels*, indicado da Figura 3.15b. O valor obtido para o *threshold* óptimo normalizado obtido foi de 0.3216. Convertendo este valor para níveis de cinza, obtém-se o nível 83 que corresponde no histograma a um mínimo local em termos de presença de *pixels* com essa intensidade de cinza. A imagem binarizada contendo apenas *pixels* com dois níveis de cinza (o nível máximo e o nível mínimo) é indicada na Figura 3.15c. No caso de um objecto mais tricolor é possível verificar que no histograma a distribuição dos *pixels* pelos níveis de cinza é maior (Figura 3.16). Neste caso o valor do *threshold* normalizado é de 0.5373, correspondendo a um nível de cinza de 138.

De notar que as imagens binarizadas indicadas nas Figura 3.13c e Figura 3.14c apresentam quase na totalidade o fundo exterior à silhueta do objecto de estudo convertido para preto (nível mínimo de cinza). Este facto é particularmente importante para as etapas seguintes na medida em que permite verificar que as imagens estão “limpas” de ruído de fundo, apenas podendo existir ruído nos limites da respectiva silhueta.

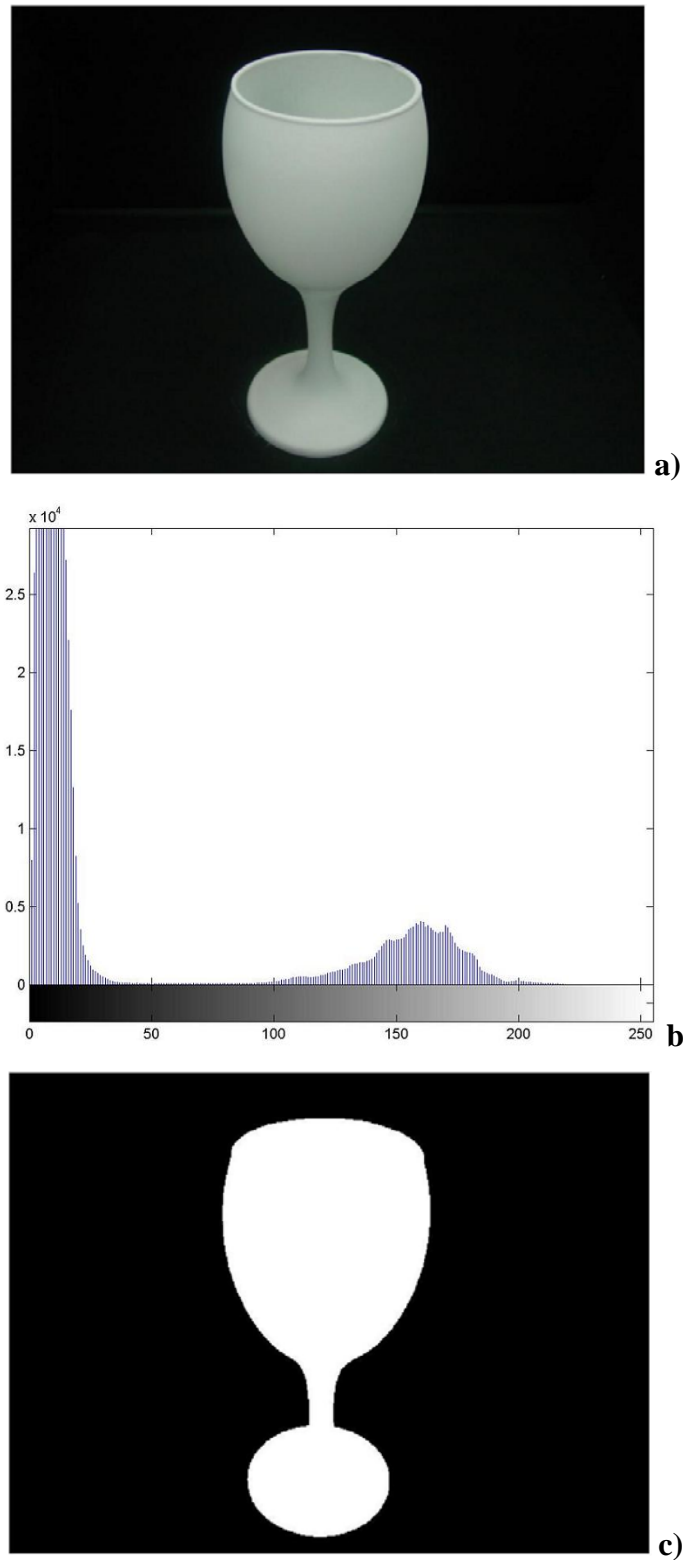


Figura 3.15 – a) Imagem original b) Histograma c) Imagem binarizada

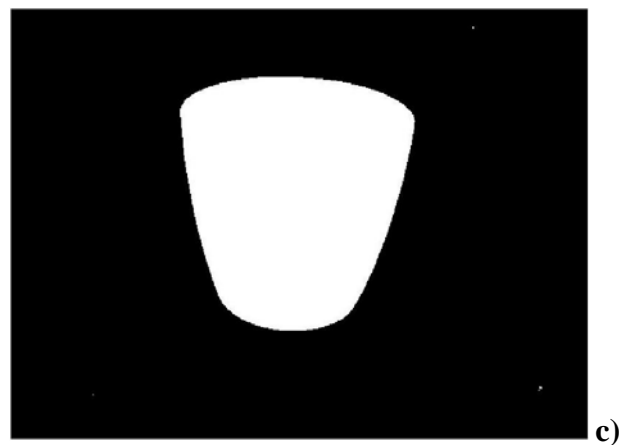
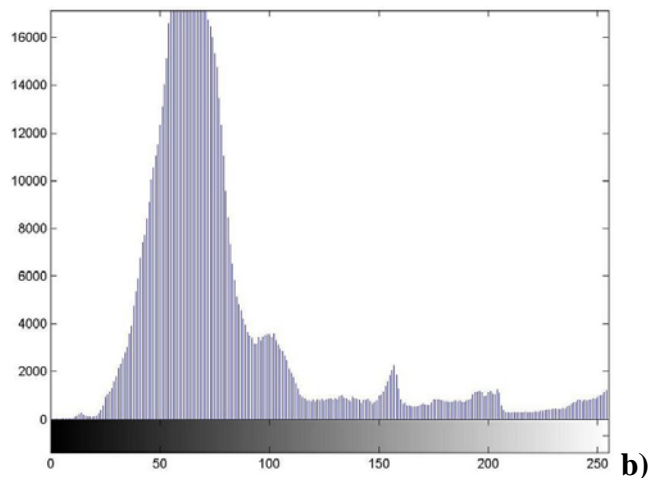


Figura 3.16 - a) Imagem original b) Histograma c) Imagem binarizada

3.4.3 Operações morfológicas

Após as etapas de calibração e binarização da imagem inicial, deve proceder-se à sua manipulação através de um conjunto de operações morfológicas, isto é, da aplicação de máscaras ou operações baseadas em matrizes padrões de modo a associar e/ou dissociar valores comuns dos pontos da imagem e da máscara (Figura 3.17). Partindo da imagem

calibrada e binarizada, torna-se fundamental eliminar o ruído existente na imagem. Deve igualmente proceder-se a operações de erosão (reduz a dimensão do objecto) e dilatação (aumenta a dimensão do objecto). Podem ainda realizar-se operações de fecho (operação de dilatação seguida de erosão), cujo resultado é o de fundir objectos que inicialmente só estariam ligados por um único pixel e que “suavizam” o objecto pelo exterior do seu contorno e operações de abertura (operação de erosão seguida de dilatação), cujo resultado é o de separar objectos que inicialmente só estariam ligados por poucos pixel e que “suavizam” o objecto pelo interior do seu contorno.

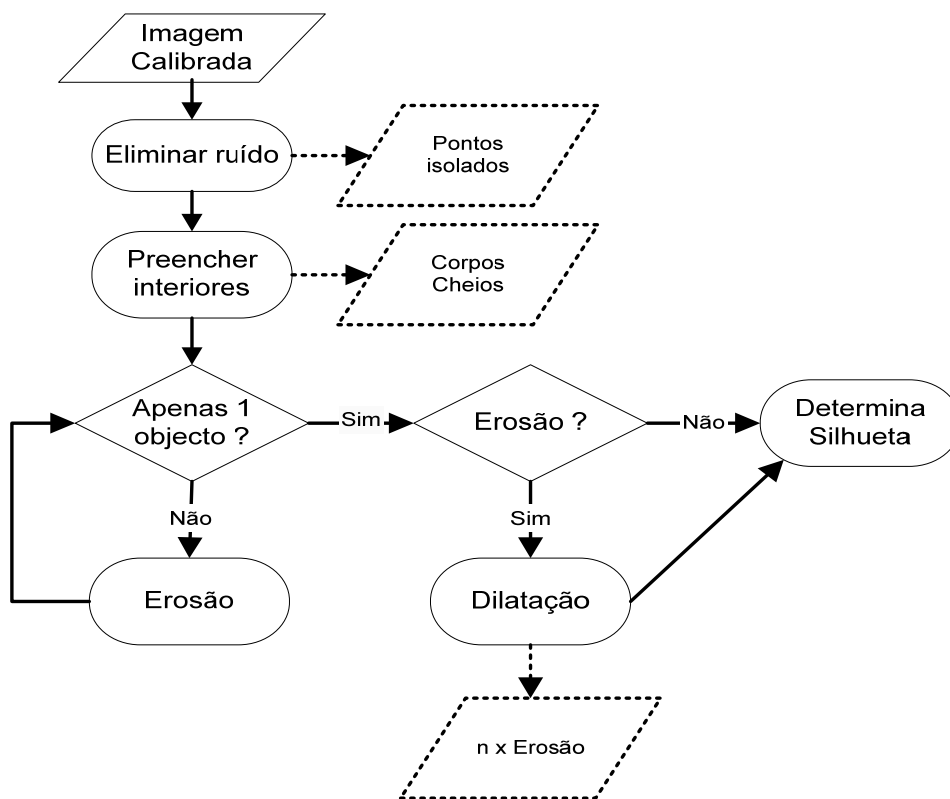


Figura 3.17 – Algoritmo fundamental das operações morfológicas a realizar sobre as imagens calibradas e binarizadas

Para se eliminar o ruído às imagens digitais considera-se o operador “majority” do programa Matlab que estabelece o valor do pixel em função da vizinhança de 3x3. Para se perceber este operador considere-se I a imagem inicial e Im a imagem resultante da aplicação do operador *majority*. Cada pixel na imagem I ou na resultante Im tem coordenadas (i,j) , com i segundo a direcção das colunas verticais e j segundo a direcção das linhas horizontais:

$$Im_{ij} = f \begin{pmatrix} I_{i-1,j-1} & I_{i-1,j} & I_{i-1,j+1} \\ I_{i,j-1} & I_{i,j} & I_{i,j+1} \\ I_{i+1,j-1} & I_{i+1,j} & I_{i+1,j+1} \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

Devido à vizinhança de nove pixels (matriz de 3×3), são tidos em conta os vizinhos nesta matriz e o valor a atribuir ao pixel em análise (pixel central) é resultante da seguinte condição: se cinco ou mais dos pixels vizinhos tiverem o mesmo valor então o pixel em análise terá o valor destes. Assim a formulação do valor do pixel Im assume a seguinte expressão:

$$Im_{ij} = \begin{cases} 1, & \sum_{-1}^1 \sum_{-1}^1 I_{i+k,j+k} \geq 5 \\ 0, & \sum_{-1}^1 \sum_{-1}^1 I_{i+k,j+k} < 5 \end{cases} \quad (3.46)$$

A formulação anteriormente apresentada é ilustrada na Figura 3.18 em que, tal como se pode observar no detalhe indicado nessa figura de acordo com a equação (3.46) o pixel $I_{3,3}$ assume o valor lógico 1, isto é, $Im_{3,3}=1$.

Na Figura 3.19 ilustra-se o efeito aplicação deste operador sobre uma imagem digital contendo ruído. Nesta Figura, a primeira imagem corresponde à imagem original binarizada. A segunda imagem é o resultado da dupla aplicação do operador *majority*. A terceira imagem corresponde à aplicação cíclica do operador até que não se verifiquem diferenças entre duas imagens sucessivas. Este exemplo, mostra assim que o operador *majority* elimina os pontos ou conjuntos de pontos que não estejam interligados ou relacionados, considerando-os como ruído. De notar que aplicação sucessiva do operador reduz o número de pontos isolados, originando igualmente alguma perda de informação relativa ao objecto, mas não elimina na totalidade o ruído existente.

$$I = \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$I_m = \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Figura 3.18 - Operador *majority* (matriz da imagem *I* e da imagem *I_m*)

Para se melhorar a qualidade da definição do objecto em estudo na imagem fotográfica, utilizou-se o operador morfológico *fill* do Matlab, que permite o preenchimento do interior do objecto em imagens binarizadas. Como este trabalho se destina a objectos axissimétricos e como as imagens captadas têm maioritariamente um contorno interior, torna-se importante que a silhueta do contorno interior do objecto seja guardada com o máximo de informação possível. Deste modo, esta etapa tem por principal função complementar a anterior, melhorando a qualidade da informação digital, na medida em que os objectos/pontos isolados já foram em grande parte eliminados. Na Figura 3.20 apresenta-se um exemplo de aplicação do operador *fill*.

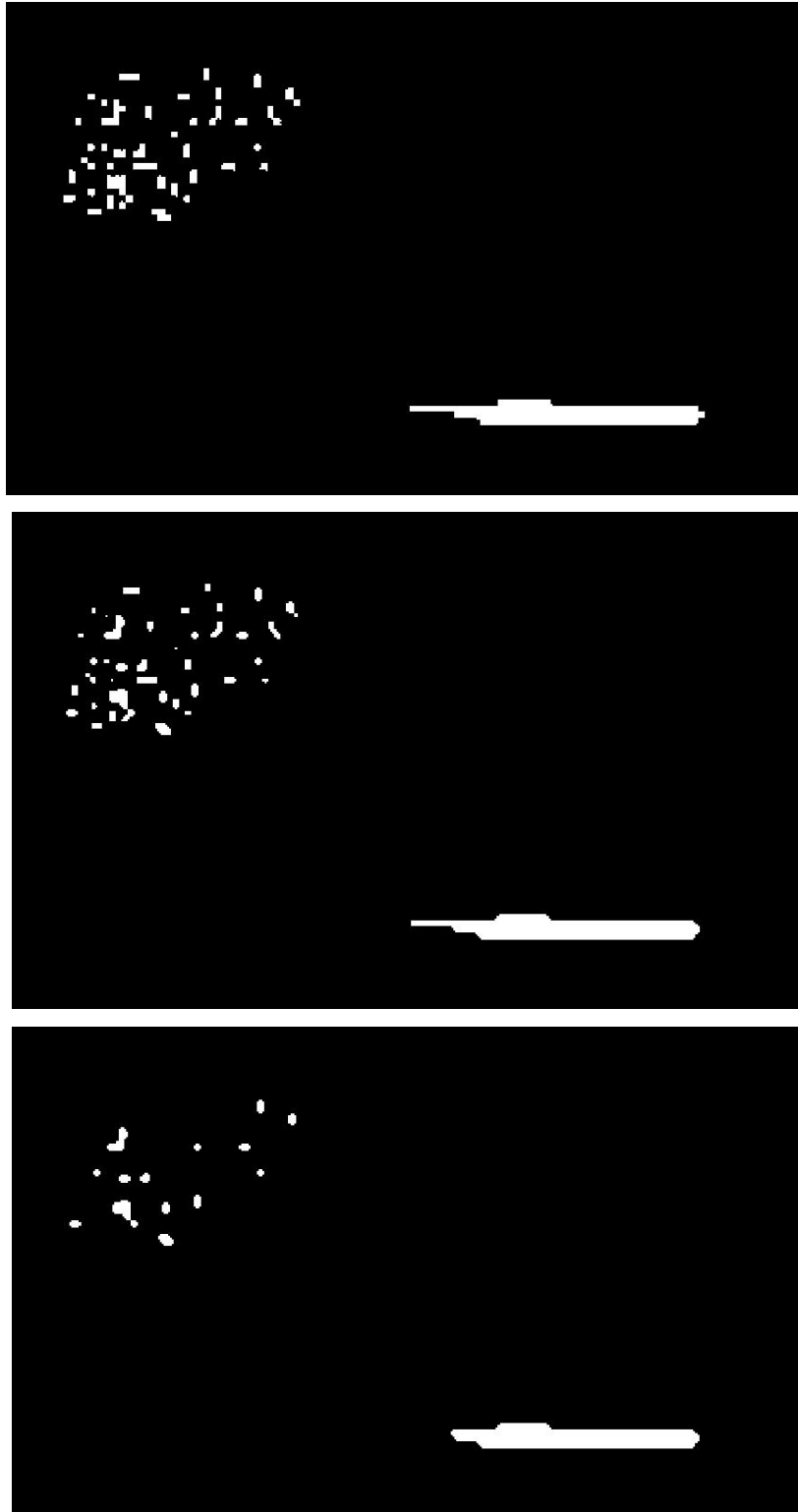


Figura 3.19 - Exemplo do operador *majority*

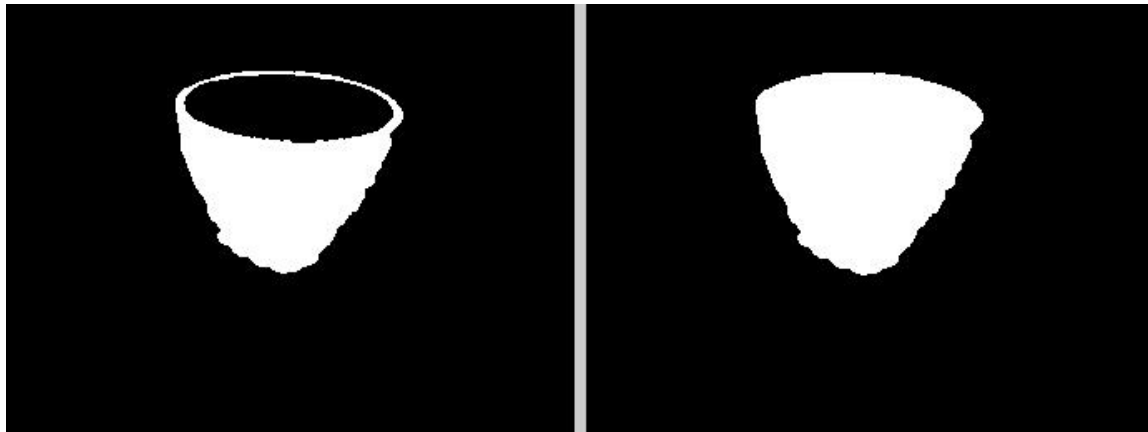


Figura 3.20 - Operador *fill*

Na Figura 3.21 ilustra-se a aplicação da subtração binária de duas imagens (imagem inicial e imagem obtida após aplicação do operador *fill*). O contorno obtido neste caso poderá ser de grande relevância, por exemplo, para a determinação da espessura do objecto. Outro exemplo de aplicação da subtração binária, neste caso a partir da imagem do objecto sem ruído, é indicada na Figura 3.22. Com a conjugação de operadores e dos seus efeitos é possível manipular as imagens digitais binarizadas.



Figura 3.21 – Exemplo de aplicação da operação da subtração binária



Figura 3.22 – Exemplo de aplicação da operação da subtração binária

Antecedendo estas operações temos de ter a certeza de que estamos a manipular apenas um objecto dentro da imagem. Para tal, o algoritmo tem que verificar se de facto apenas um objecto está presente na imagem. Assim, os objectos são reduzidos a um único ponto representativo do seu centro de massa. Se o número de pontos for superior a um, é porque

existe mais do que um objecto na imagem. Este procedimento corresponde à acção indicada na Figura 3.23 que representa parte das operações previamente indicadas na Figura 3.17.

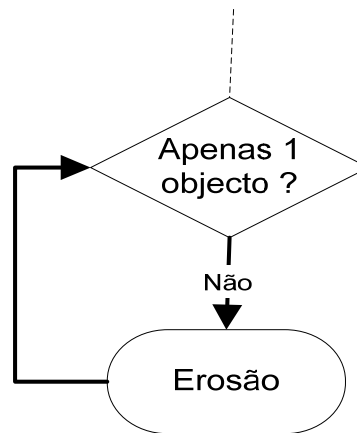


Figura 3.23 – Manipulação de um só objecto na imagem

Esta operação é realizada com auxílio do operador *shrink* do programa Matlab, operador morfológico que efectua uma erosão ao objecto, eliminando uma linha de perímetro ao contorno do mesmo. Para reduzir o objecto a um ponto, é necessário aplicar-se este operador de modo cíclico à imagem. A rapidez de execução do algoritmo depende da resolução da imagem, da quantidade de objectos e do tamanho destes. Na Figura 3.24 ilustra-se a aplicação do operador *shrink*, sendo visível que a binarização não foi a mais adequada uma vez que o ruído existente é significativo. Aumentando o valor do *threshold* melhora-se a qualidade da informação digital tal como se indica na Figura 3.25. Estes resultados mostram mais uma vez que o nível de *threshold* constitui um parâmetro fundamental no processamento de imagens.

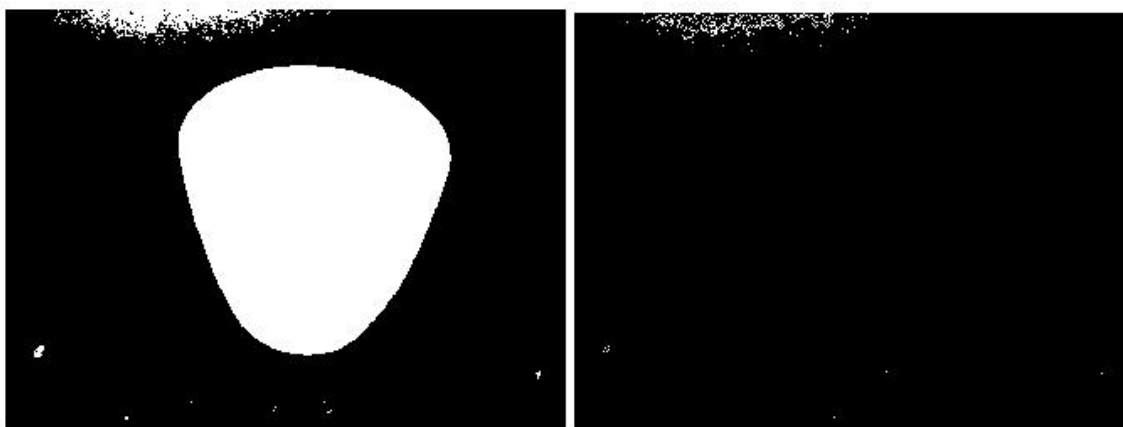


Figura 3.24 - Operador *Shrink* com *threshold* 0.802



Figura 3.25 – Operador *Shrink* com *threshold* 0.931

3.4.4 Detecção de fronteiras

Nesta etapa do algoritmo o utilizador poderá ter alguma intervenção se assim o entender, isto é, o algoritmo é totalmente automático na procura de parâmetros mas nesta etapa é permitido ao utilizador corrigir alguns dos parâmetros, tendo a hipótese de visualizar o resultado previsível dos parâmetros encontrados.

A detecção de fronteiras é uma etapa fundamental no processamento de imagens uma vez que as fronteiras delimitam os objectos e fornecem informações importantes na extracção de diversas características. O problema da detecção de fronteiras tem sido bastante estudado nos últimos anos e diversas abordagens têm sido propostas. O método de detecção de fronteiras adoptado neste trabalho assenta no detector de Canny proposto por John Canny (Canny, 1986). Este detector baseia-se no trabalho desenvolvido por Marr e Hildreth (Marr et Hildreth, 1980) que visava a detecção de fronteiras com boa localização utilizando a convolução da imagem original com o Laplaciano da função Gaussiana.

O método de Canny é fundamentado na primeira derivada da função de Gauss (a uma dimensão):

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (3.47)$$

ou seja

$$G'(x) = -\frac{x}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma^3} \cdot e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (3.48)$$

com σ o desvio padrão da distribuição Gaussiana. A segunda derivada da função de Gauss é dada por:

$$G''(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma^3} \cdot e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} \cdot \left[\frac{x^2}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (3.49)$$

Na Figura 3.26 representam-se graficamente a função de Gauss assim como a respectiva primeira e segunda derivada.

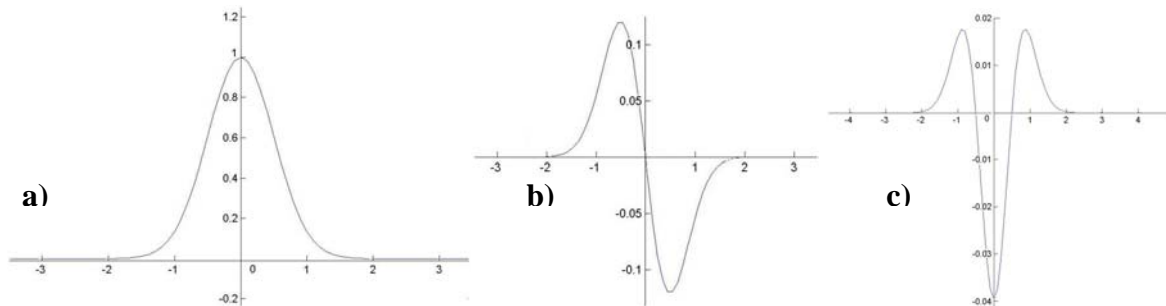


Figura 3.26 - Função Gaussiana a) e respectivas 1.ª e 2.ª derivada (b, c)

O método de Canny consiste assim no processamento dos sinais compostos pelas linhas e colunas da imagem convoluindo com Gaussianas unidimensionais e suas derivadas nos eixos X e Y. Deste modo, o método extrai as fronteiras dos sinais unidimensionais das colunas e das linhas da imagem individualmente e posteriormente realiza a composição do resultado. De notar que a primeira derivada da convolução da função f com a função Gaussiana,

$$g(x, y) = D[Gauss(x, y) \cdot f(x, y)] \quad (3.50)$$

é equivalente à função com a derivada da função Gaussiana

$$g(x, y) = D[Gauss(x, y)] \cdot f(x, y) \quad (3.51)$$

Algebricamente, a convolução de uma função f com a função G , é definida como uma operação de multiplicação de polinómios.

No detector de Canny podem ser identificadas quatro etapas fundamentais:

- Suavização,
- Diferenciação,

- Supressão não máxima,
- Limiarização adaptativa ou histerese.

As duas primeiras etapas geram uma superfície onde para cada localização correspondente a um pixel da imagem original se associa uma cota dada pela magnitude de gradiente. Se essa superfície for transformada numa imagem denominada “imagem de magnitude do gradiente” as fronteiras serão visualizadas como traços com vários pixels. O refinamento é realizado pelo processo de supressão não máxima. O processo de histerese é o último passo a ser realizado, consistindo basicamente em complementar as fronteiras refinadas obtidas previamente e eliminar pelo menos parte das fronteiras espúrias.

Importa salientar que no detector de Canny é possível combinar as operações de suavização e detecção numa convolução de 1ª ordem, quer seja através da convulsão da 1ª derivada *Gaussiana* e encontrando os picos (os máximos) ou através da 2ª derivada e encontrando os zeros da 2ª derivada (pontos de inflexão), tal com se indica na Figura 3.27.

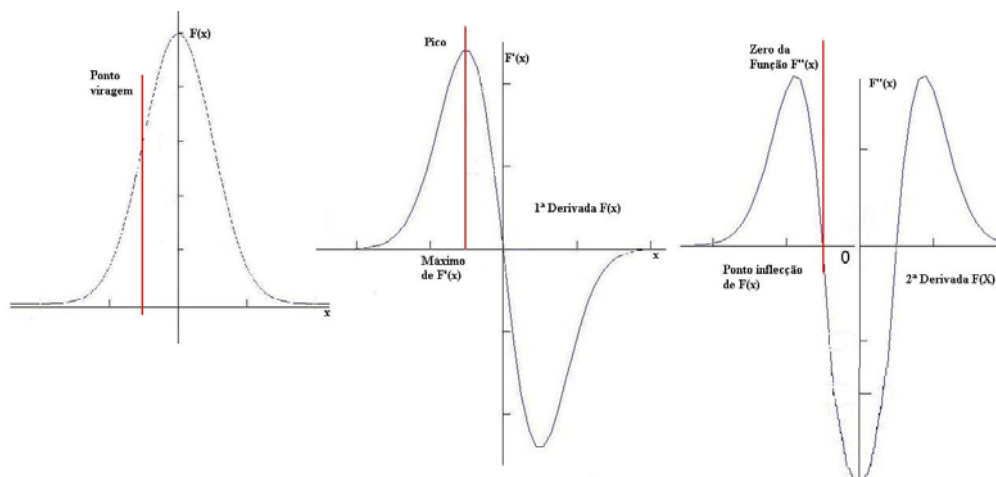


Figura 3.27 – Identificação dos pontos considerados, pico na 1.ª derivada de função *Gaussiana* b) e inflexão na 2.ª derivada a função *Gaussiana* c)

Etapa 1 – Suavização de imagem

Nesta etapa, a imagem original é suavizada fazendo-se uma convolução com uma função *Gaussiana* unidimensional em cada direcção. Tal deve-se ao facto da convolução bidimensional da *Gaussiana* ser complexa.

Etapa 2 – Diferenciação

Assumindo a convulsão bi-dimensional da Etapa 1 (suavização), a imagem suavizada é derivada segundo x e y através do gradiente da convulsão da Gaussiana segundo estas direcções. Por outro lado, os valores segundo a direcção x da imagem suavizada são convulsionados com a 1ª derivada da função Gaussiana com idêntico desvio padrão. De forma similar, os valores segundo a direcção y da imagem suavizada são convulsionados com a 1ª derivada da função Gaussiana com idêntico desvio padrão. Dos gradientes x e y , a magnitude e o ângulo de desvio pode ser obtido a partir da hipotenusa e arco-tangente calculados computacionalmente.

Etapa 3 – Eliminação de *não-máximos* (Non-Maximum Suppression)

Com base no gradiente de cada ponto da imagem, as fronteiras devem de ser colocados nos pontos de máximo ou, de outra forma, os pontos de *não-máximos* devem ser eliminados. Um máximo local ocorre quando se verifica um pico na função gradiente ou, alternativamente onde a derivada da função gradiente é zero. Contudo, o objectivo é suprimir os pontos de *não-máximo* perpendiculares à direcção da fronteira privilegiando os paralelos à direcção da mesma, desde que a continuidade ao longo da fronteira seja garantida. O processo de eliminação de não-máximos é baseado numa vizinhança de 9 pontos, conforme Figura 3.28. Nesta figura a normal à direcção da fronteira apresenta componentes (u_x, u_y) .

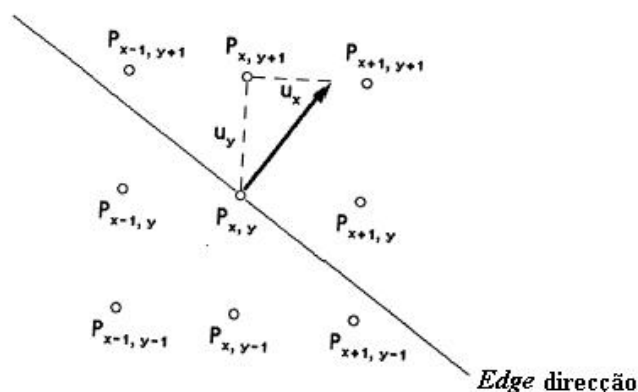


Figura 3.28 – Operação de eliminação de *Não-Máximo*

Assim, o objectivo desta operação é eliminar pontos de *não-máximo* na direcção perpendicular à direcção dos pontos máximos de gradiente (Canny, 1983 e Hui-Fuang, 2006). Contudo, como apenas temos valores discretos de gradiente para os pontos $P_{i,j}$, são

necessários 3 pontos para eliminar *não-máximos*, um dos quais é o ponto $P_{x,y}$ e os restantes dois pontos são estimados através do vector u com valores discretos de gradiente. Para qualquer vector u , consideramos dois pontos dos 8-pontos vizinhança de $P_{x,y}$ que estão próximos da linha que passa por $P_{x,y}$ na direcção de u . O gradiente nestes dois pontos juntamente com o gradiente do ponto $P_{x,y}$ define um plano que corta a superfície do gradiente. Este plano é usado para aproximar localmente a superfície e estimar o valor do ponto na linha, na Figura 3.28, o ponto intermédio de $P_{x,y+1}$ e $P_{x+1,y+1}$ que está alinhado com a fronteira. O valor de gradiente interpolado é dado por (Canny, 1983):

$$G_1 = \frac{u_x}{u_y} \cdot G(x+1, y+1) + \frac{u_y - u_x}{u_y} \cdot G(x, y+1) \quad (3.52)$$

De modo semelhante, o gradiente interpolado para o ponto oposto de $P_{x,y}$ é,

$$G_2 = \frac{u_x}{u_y} \cdot G(x-1, y-1) + \frac{u_y - u_x}{u_y} \cdot G(x, y-1) \quad (3.53)$$

O ponto $P_{x,y}$ é marcado como máximo de $G(x, y) > G_1$ e $G(x, y) > G_2$. A interpolação é semelhante para outras direcções de gradiente e envolve sempre uma diagonal e um ponto não pertencente à diagonal.

Etapa 4 – *Threshold do edge*

O *threshold* usado pelo método de Canny baseia-se no chamado método da histerese. A maioria dos métodos usam apenas um limite, isto é, como os valores do gradiente da fronteira são obtidos por interpolação e sofrem flutuações, acima e abaixo do valor de *threshold* da fronteira, poderão ocorrer rupturas destas designadas por “*streaking*”.

O método adoptado estabelece um limite superior e um inferior para o valor do gradiente. Se este ultrapassar o limite superior é automaticamente aceite, caso contrário é rejeitado. Deste modo, os pontos são aceites se estiverem dentro dos limites superior e inferior, e se se relacionam com pixels da fronteira. Assim, devido a esta dupla semelhança o “*streaking*” é reduzido drasticamente. Segundo Canny (1983), a relação entre o limite superior e o inferior deverá, ser de três ou dois para um.

Na Figura 3.29 apresenta-se a imagem de um objecto de estudo. Esta imagem é binarizada utilizando-se o algoritmo de Canny com a obtenção automática de parâmetros (Figura

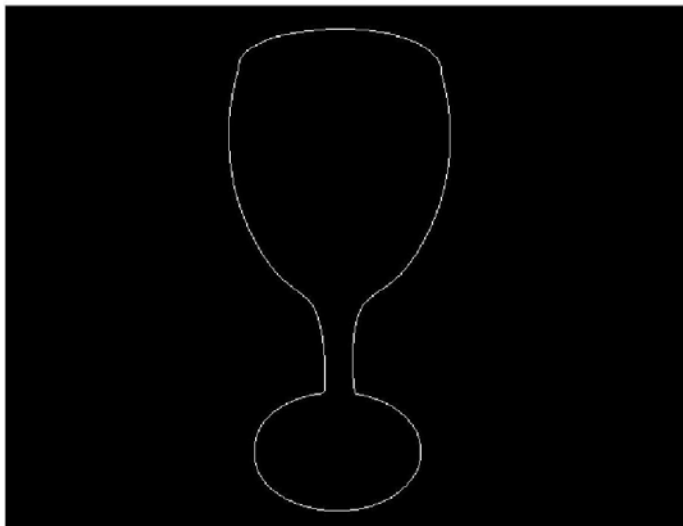
3.29b). Estes valores são o desvio padrão e o intervalo de *threshold*. No caso de obtenção automática estes valores são de 0.63 a 0.81 para o intervalo de *threshold* e de 2 para o desvio padrão. Forçando-se os parâmetros (0.32 a 0.8 para o intervalo de *threshold* e de 2 para o desvio padrão) obtém-se uma imagem de pior qualidade. Assim, neste caso o algoritmo de *Canny* mostrou-se ser bastante robusto, identificando apenas uma linha de fronteira.

Os resultados obtidos com outros exemplos (Figura 3.30 e Figura 3.31) mostram que os parâmetros do algoritmo de *Canny* (*threshold* e desvio padrão) são determinantes na detecção de fronteiras. O parâmetro para o qual o algoritmo se mostra mais sensível é o *threshold*.

Imagem Real



Parametros automaticos



[0.32 0.8] e sigma 2



Figura 3.29 - Exemplo de objecto testado (copo)

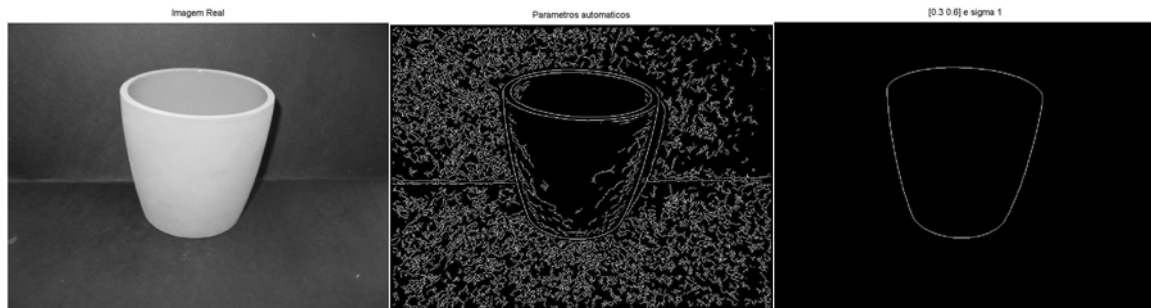


Figura 3.30 - Exemplo de outro objecto testado (vaso)

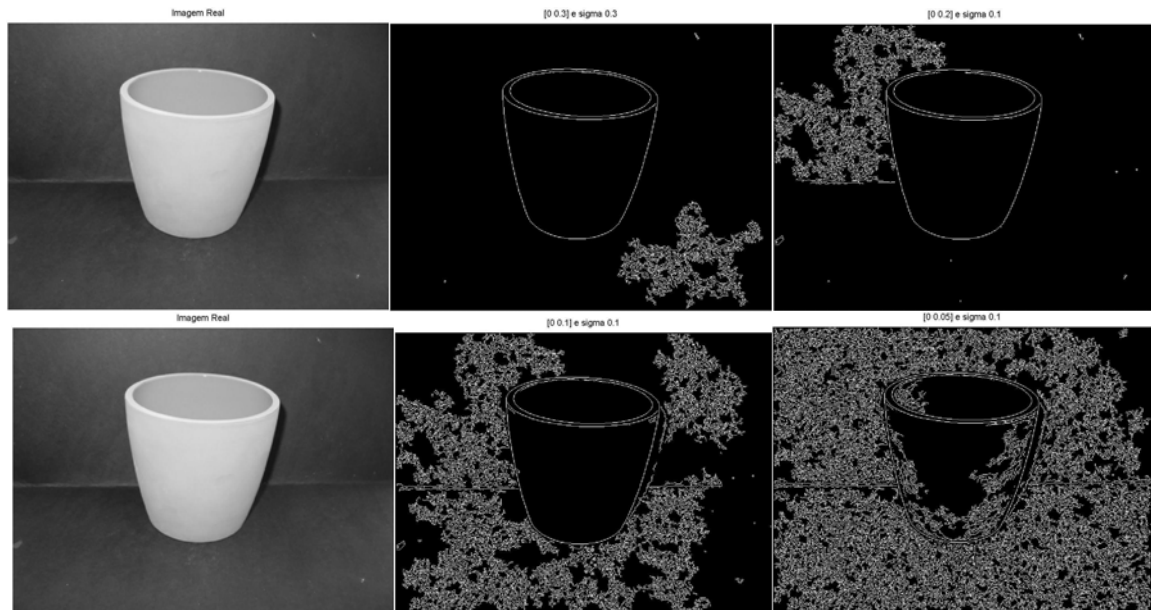


Figura 3.31 - Diferentes parametrizações do operador de *Canny*

Dada a relevância do valor do *threshold*, tal como se mostrou anteriormente, o código desenvolvido permite ao utilizador definir o seu valor e visualizar automaticamente o respectivo efeito tal como se indica na Figura 3.30. Neste caso é apresentada a imagem original *RGB*, a imagem binarizada com os parâmetros automáticos do algoritmo e a imagem binarizada com os parâmetros forçados (definidos) pelo utilizador.

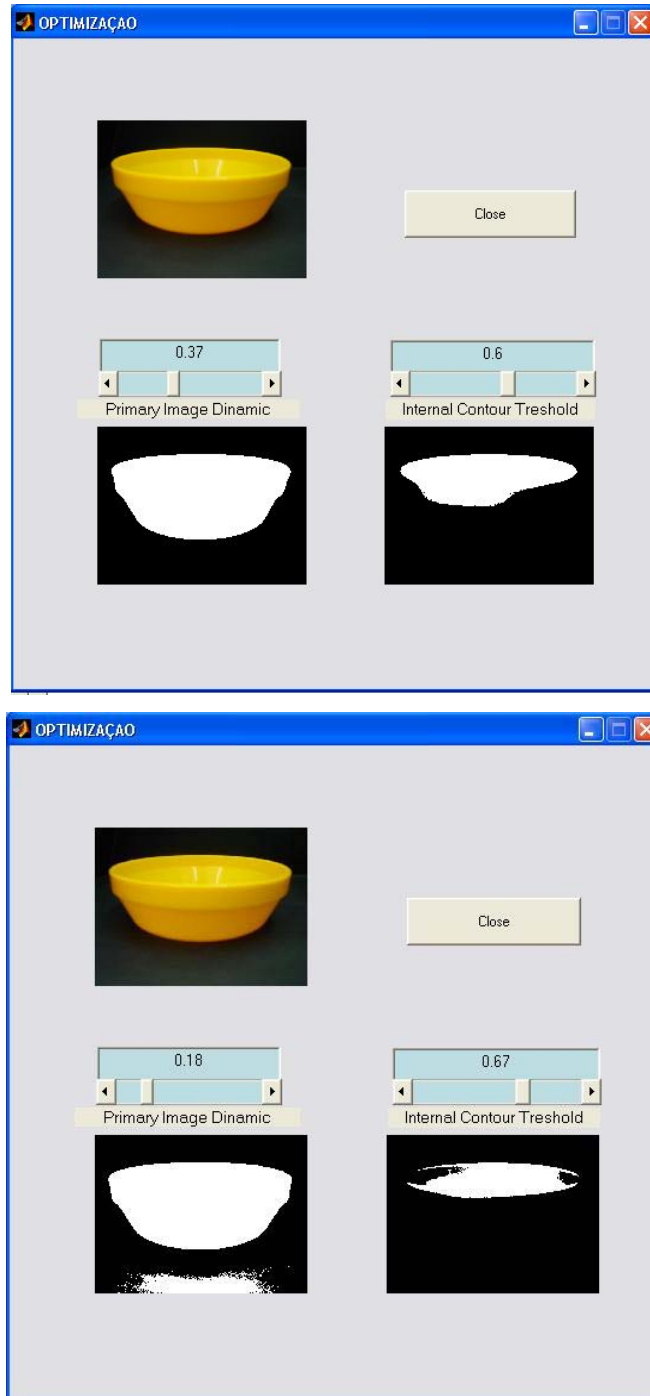


Figura 3.32 - Interface de alteração de *threshold* e visualização de imagem binarizada

3.5 Modelação 3D

Concluída a etapa de optimização bem como as etapas anteriores é possível proceder-se à modelação 3D do objecto com base na informação relativa à silhueta do objecto e à espessura. Esta operação compreende duas etapas (Figura 3.35):

- Reconstrução 3D,
- Definição de um modelo em formato STL.

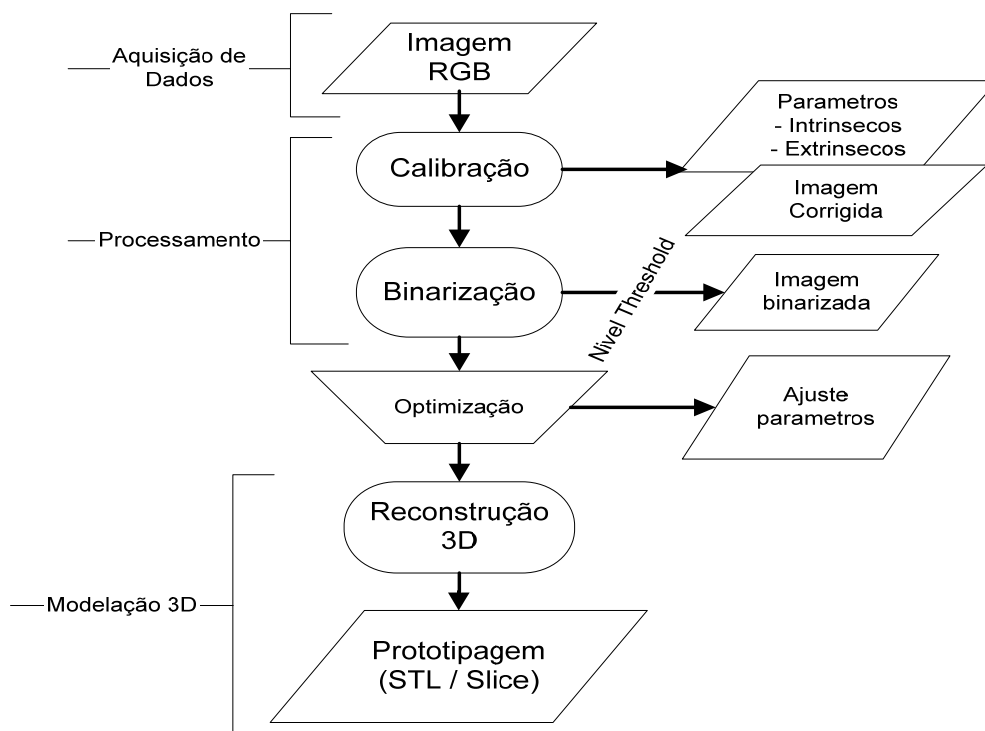


Figura 3.33 - Fluxograma de todo o processo

3.5.1 Reconstrução 3D

O processo de reconstrução 3D compreende um conjunto de etapas computacionais. Uma vez detectada a silhueta do objecto que corresponde a uma definição 2D do objecto, é necessário proceder-se a uma operação do tipo revolução de modo a obter-se o objecto 3D. Para tal definimos uma espessura de *fatiamento* da silhueta do objecto, com base no eixo de simetria do objecto, medindo-se fatia a fatia o respectivo raio médio. O número de fatias ou camadas determina a qualidade da reconstrução, sendo determinado com base no

número de pixels da silhueta, isto é, teremos tantas camadas quantos os pixels que representem a silhueta. Uma vez que o problema abordado neste trabalho de investigação se centra em objectos axissimétricos e como temos identificado o eixo de simetria, a metodologia encontrada baseia-se na análise do valor da distância entre o eixo de simetria e a linha da silhueta de cada lado do eixo, isto é, a linha perpendicular ao eixo de simetria que intercepta as linhas da silhueta (Figura 3.36).

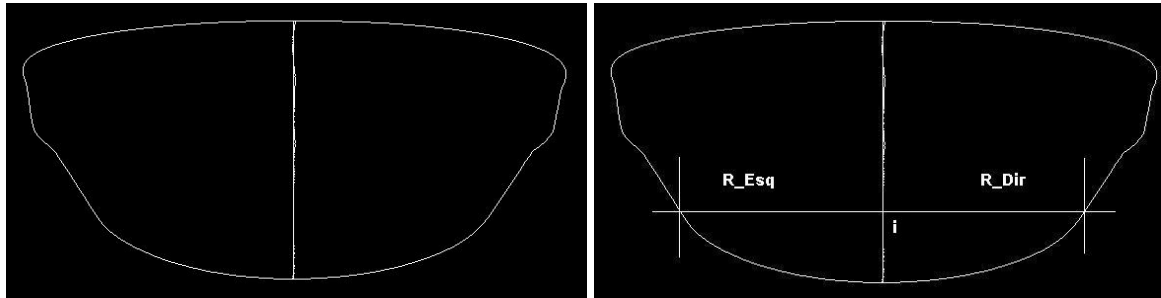


Figura 3.34 - Modelação 3D

A metodologia adoptada avalia o valor do raio médio, cuja medida é obtida com base nos raios, quer à esquerda, quer à direita da linha i , perpendicular ao eixo de simetria do objecto. Deste modo, o raio médio da linha i é dado por meio da seguinte equação:

$$R_{mi} = \frac{(R_Esq_i + R_Dir_i)}{2} \quad (3.54)$$

Geram-se desta forma, os valores do raio para cada camada, tal como se indica na Figura 3.34. Neste caso, e como em todos os outros estudados neste trabalho (ver Capítulo 4), uma vez determinado o raio em cada camada do objecto utilizam-se coordenadas polares com centro no eixo de simetria para, em cada camada, se proceder a uma revolução de 360° do correspondente segmento da silhueta, gerando-se assim, camada a camada, a superfície do objecto 3D. De notar que a amplitude do ângulo é um parâmetro que o operador pode controlar, determinando assim a qualidade da superfície. A amplitude considerada neste trabalho foi de 3° .

O facto do modelo 3D ser construído camada a camada em ambiente virtual, constitui uma vantagem importante na medida em que esta informação pode ser utilizada para reproduzir fisicamente, de forma directa, os objectos através da utilização de técnicas aditivas de prototipagem rápida.

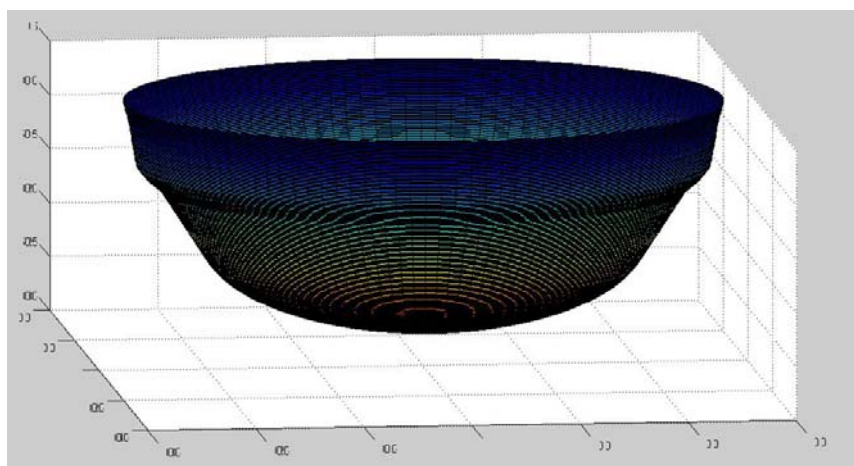


Figura 3.35 - Modelação Objecto 3D

3.5.2 Definição de um modelo em formato STL

A definição de informação para prototipagem rápida envolve a definição de um modelo CAD 3D, a criação do respectivo modelo STL e o seu fatiamento. Neste caso, dado que o procedimento de reconstrução 3D se faz por camadas, não é necessário seguir-se este procedimento, uma vez que a informação de cada camada utilizada na reconstrução serve também directamente para prototipagem rápida. A criação de modelos STL, deixa assim de ser relevante como formato de transferência de informação para prototipagem rápida, mas continua a ser necessário caso se pretenda utilizar a informação gerada pelo sistema de reconstrução em sistemas de Engenharia Assistida por Computador ou de Fabrico Assistido por Computador.

Uma vez definido o modelo de superfícies 3D este deve em seguida ser convertido num modelo formato STL (SLT = STereo-Lithography) em que as superfícies são descritas através de uma “malha” envolvente de triângulos (semelhante a uma rede de elementos finitos), que constituem do ponto de vista matemático a forma polinomial mais simples para a descrição de uma superfície. Este formato, desenvolvido pela empresa 3D Systems em 1987, rapidamente se transformou no formato *standard* para os diferentes processos de prototipagem rápida.

Os ficheiros STL podem apresentar-se em dois formatos distintos, o binário e o ASCII. Os ficheiros em formato ASCII (Figura 3.36) principiam sempre com a palavra **solid** e

terminam com a palavra **endsolid**. Entre estas duas palavras é feita a definição dos triângulos que definem as faces do modelo CAD. A normal exterior a cada triângulo é um vector unitário que no caso de não estar definido é gerado de forma automática pela maioria dos softwares existentes (Figura 3.37). De notar que os ficheiros em binário que constituem um espelho dos ficheiros ASCII são no entanto mais pequenos que os ficheiros em ASCII.

```
solid nome
facet normal x y z
  outer loop
    vertex x y z
    vertex x y z
    vertex x y z
  endloop
endfacet
endsolid nome
```

Figura 3.36 - Ficheiro STL em ASCII (as coordenadas dos vértices dos triângulos são genericamente representadas por x-y-z)

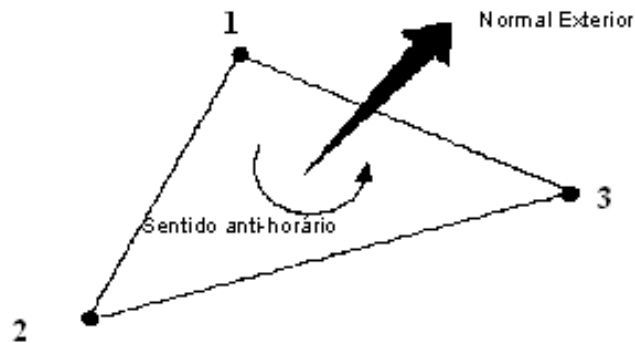


Figura 3.37 - Orientação da normal e numeração dos vértices de cada triângulo

A definição da rede de elementos triangulares que constituem o modelo STL e que aproximam as superfícies do modelo CAD 3D deve obedecer aos seguintes critérios:

- i) Regra da orientação dos triângulos: a orientação de cada triângulo é feita pela ordenação dos seus vértices no sentido anti-horário,

- ii) Regra da adjacência: cada triângulo deve partilhar dois vértices com cada um dos triângulos que lhe é adjacente,

Para a verificação da regra da adjacência devemos ainda ter em consideração um conjunto de princípios de consistência dados por:

- o número de triângulos deve ser par,
- o número de arestas deve ser um múltiplo de 3,
- o número de arestas deve ser igual a 1,5 do número de triângulos,
- sendo T o número de triângulos, o número de vértices é dado por

$$V = 0,5 \cdot T + 2 \quad (3.55)$$

Estas condições traduzem-se no cumprimento da regra de Euler que para um elemento triangular se traduz por:

$$T + V - A = 2 \quad (3.56)$$

com T o número total de triângulos, V o número total de vértices e A o número total de arestas.

- iii) Regra de Mobius: no caso de triângulos adjacentes e dada a ordenação dos vértices a direcção de um lado de um triângulo é oposta à direcção do mesmo lado no triângulo adjacente.

A geração da rede de elementos triangulares definidores do modelo STL é feita através da função *trimesh* do programa Matlab que utiliza o método de Delaunay.

CAPITULO 4

RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Introdução

Este capítulo descreve a aplicação do algoritmo apresentado no Capítulo 3 a um conjunto de 5 casos seleccionados por apresentarem características distintas em termos de forma, geometria, dimensões e materiais. Para tal foi utilizada uma câmara HP 850, lente de 7mm e imagens com resolução de 640x480, Tabela 4.1, a máquina utilizada é idêntica à máquina PULNiX CCD usada por Zhang para desenvolvimento do algoritmo de calibração considerado nesta tese. Os parâmetros intrínsecos da câmara obtidos através do algoritmo desenvolvido são indicados na Tabela 4.2.

| Tabela 4.1 – Características da máquina fotográfica utilizada | |
|--|----------------------|
| Característica | Valor |
| Resolução efectiva | 3,94 MP |
| Sensor (CCD) | diagonal 8,970mm |
| Profundidade de cor | 36 bits (12bit/cor) |
| Distância focal | 7,6mm |
| Número F | f/2,8 |
| Velocidade obturador | 1/2000 a 16 segundos |

| Tabela 4.2 – Parâmetros intrínsecos da câmara HP850 | |
|--|---|
| Parâmetro | Valor |
| Distância focal - fc | [1340.68785 1339.21185] ± [57.33079 57.64012] |
| Ponto Principal - cc) | [552.55765 384.82319] ± [4.16222 9.20111] |
| Ângulo eixo pixeis | 90.00000 ± 0.00000 graus |
| Distorção - kc | [-0.30935 0.26858 0.00390 0.00143 0.00000] ± [0.02964 0.05631 0.00192 0.00144 0.00000] |

De salientar que os parâmetros intrínsecos da câmara foram obtidos através da utilização de várias imagens, tendo-se neste caso considerado duas imagens de cada objecto de estudo num total de 5 objectos.

4.2 Caso de estudo 1 – vaso de cor amarela

O objecto considerado neste caso de estudo é um vaso de baixa altura com 48mm, com 115mm de diâmetro mínimo na base, com 142mm de diâmetro máximo no topo e paredes com espessura de 2,2mm. Este apresenta duas regiões distintas, um tronco cilíndrico no topo e um troço cónico invertido na base. Trata-se de um objecto de plástico de cor amarela apresentando paredes lisas.

A primeira etapa, associada ao processo de reconstrução digital do objecto, consistiu na respectiva calibração da imagem. Para tal foram utilizadas, tal como se indicou na secção 4.1 duas imagens para cada objecto, no sentido de se obterem os parâmetros intrínsecos da câmara. Com estes parâmetros e utilizando-se duas imagens para cada objecto procedeu-se à respectiva correcção, tendo-se considerado para efeitos de reconstrução os resultados correspondentes à imagens que apresentavam maior afinidade entre o tamanho de pixel, segundo xx e yy . Utilizou-se neste processo um padrão de calibração tal como se indica na Figura 4.1.

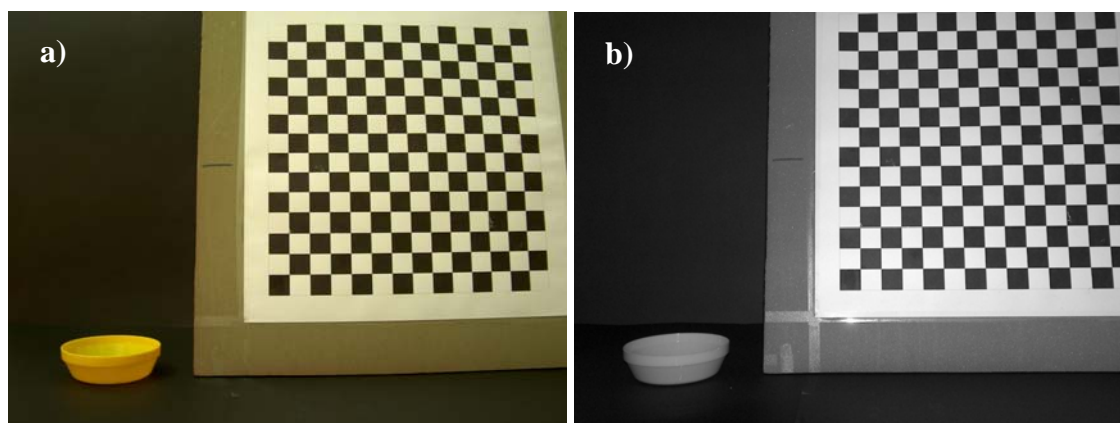


Figura 4.1 – a) Imagem com padrão calibração, b) Imagem corrigida

Os parâmetros extrínsecos resultantes da calibração indicam-se na Tabela 4.3. Na Figura 4.2 representam-se, respectivamente, o plano de calibração e o plano de imagem.

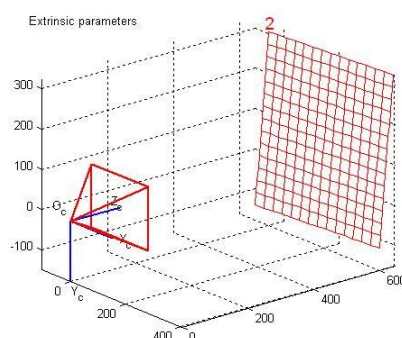


Figura 4.2 – Representação de plano de calibração

| Tabela 4.3 - Caso de estudo 1: parâmetros extrínsecos da imagem | | | |
|---|--------------|------------|--------------|
| Parâmetro | Valor | | |
| Vector Translação – Tc_{ext} | [-26.837136 | 108.672225 | 628.242208] |
| Vector Rotação - omc_{ext} | [3.027987 | -0.011511 | -0.000681] |
| Matriz Rotação - Rc_{ext} | [0.999971 | -0.007553 | -0.000879 |
| | -0.007604 | -0.993528 | -0.113337 |
| | -0.000017 | 0.113340 | -0.993556] |
| Tamanho Pixel – $[er_{xx} \ er_{yy}]$ | [0.31495 | 0.34009] | |

Considerando os valores obtidos anteriormente procedeu-se à calibração da imagem do objecto, como se indica na Figura 4.3.

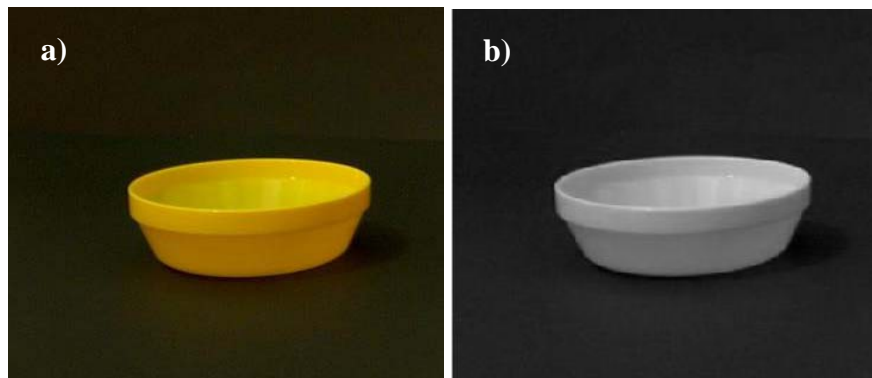


Figura 4.3 – a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração

Uma vez obtida a imagem calibrada, esta serviu de *input* ao processo de reconstrução. A primeira etapa deste processo corresponde à definição da silhueta do objecto tal como se indica na Figura 4.4. Os resultados mostram que o algoritmo implementado foi capaz de identificar as duas regiões características do objecto, isto é, o troço cilíndrico e o troço cónico.

Após definição da silhueta do objecto e da sua superfície exterior, o algoritmo procede à definição do modelo STL (Figura 4.5). A informação contida neste formato é fundamental para operações posteriores de simulação, usando software de elementos finitos ou reprodução física do objecto, utilizando-se técnicas aditivas de prototipagem rápida.

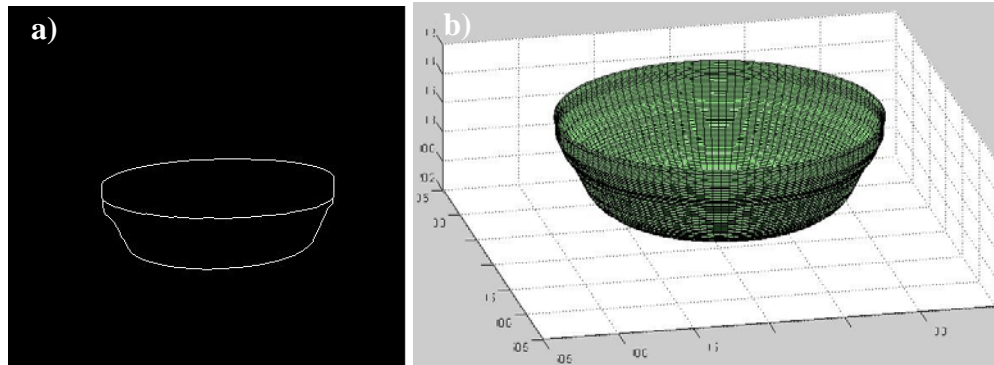


Figura 4.4 –a) Silhueta exterior, b) Superfície exterior

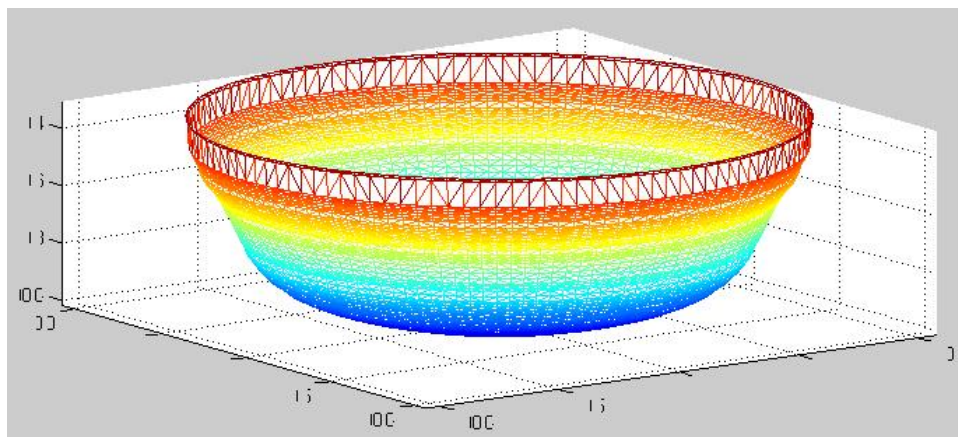


Figura 4.5 - STL da superfície exterior

De acordo com a forma como o algoritmo foi estruturado, uma vez, definida a superfície exterior do objecto e respectiva aproximação STL, procedeu-se à definição da superfície interior seguindo os passos descritos anteriormente, isto é, identificação da silhueta interior (Figura 4.6a), definição da superfície interior (Figura 4.6b), criação do modelo STL da superfície interior (Figura 4.7a) e finalmente, a combinação da informação correspondente à superfície exterior e interior do objecto. Todas estas etapas ocorreram usando-se a mesma imagem calibrada.

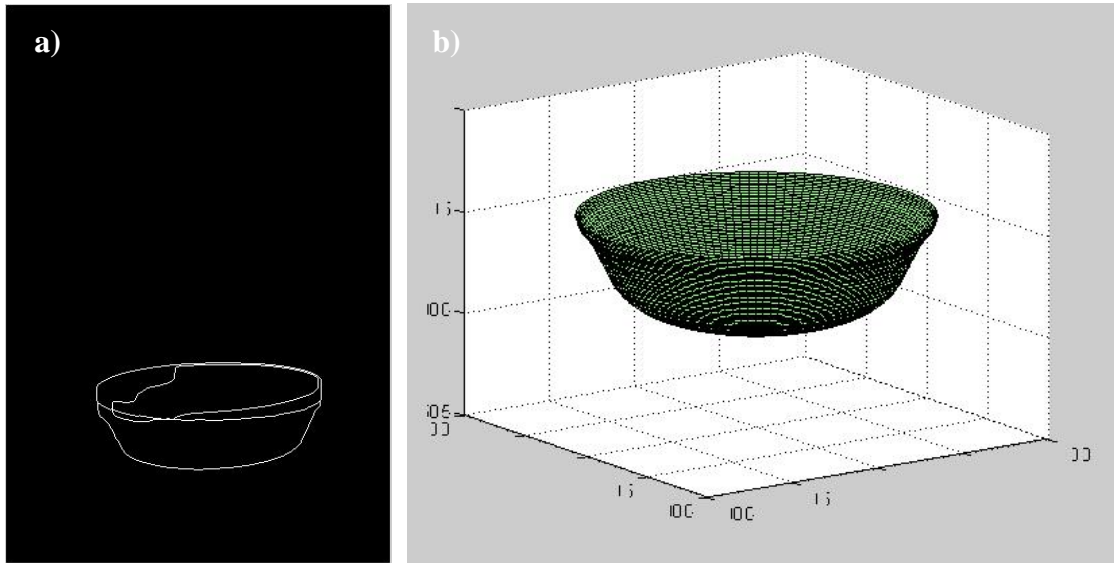


Figura 4.6 – a) Silhueta completa, b) Superfície interior

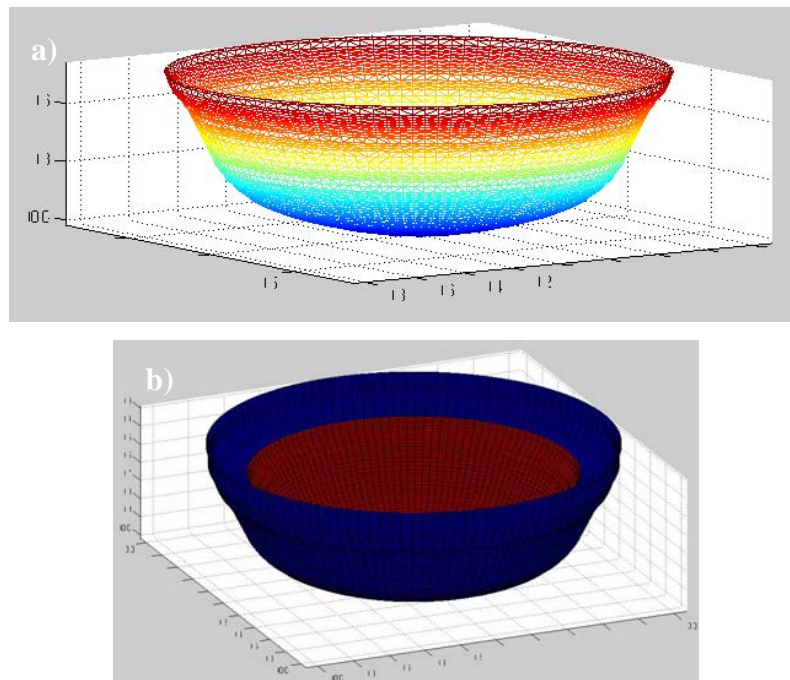


Figura 4.7 – a) STL da superfície interior, b) Superfície total(interior e exterior)

O valor da espessura do objecto reconstruído é de 1,5mm, o diâmetro máximo do topo de 78mm, a altura de 25mm. Relacionando a altura com o diâmetro, temos uma relação de 0,31 para o objecto reconstruído e de 0,33 para o objecto real. Temos então uma reconstrução muito aproximada do objecto, com um erro de aproximadamente 6,06%.

4.3 Caso de estudo 2 – Copo de cor branca

O objecto considerado neste caso de estudo é um copo, com altura de 99 mm, 43mm diâmetro mínimo na base e 69mm de diâmetro máximo no topo, paredes com espessura inferior a 1mm e com um rebordo no topo com 3mm de espessura. Este objecto caracteriza-se por um troço cónico invertido até à base. Trata-se de um objecto em plástico de cor branca e a sua superfície apresenta pequenos rasgos transversais.

Os parâmetros extrínsecos resultantes da calibração indicam-se na Tabela 4.4. Na Figura 4.8 representam-se, respectivamente, a imagem não calibrada e calibrada do objecto com o padrão de calibração. Na Figura 4.9 representam-se, respectivamente, o plano de calibração e o plano de imagem.

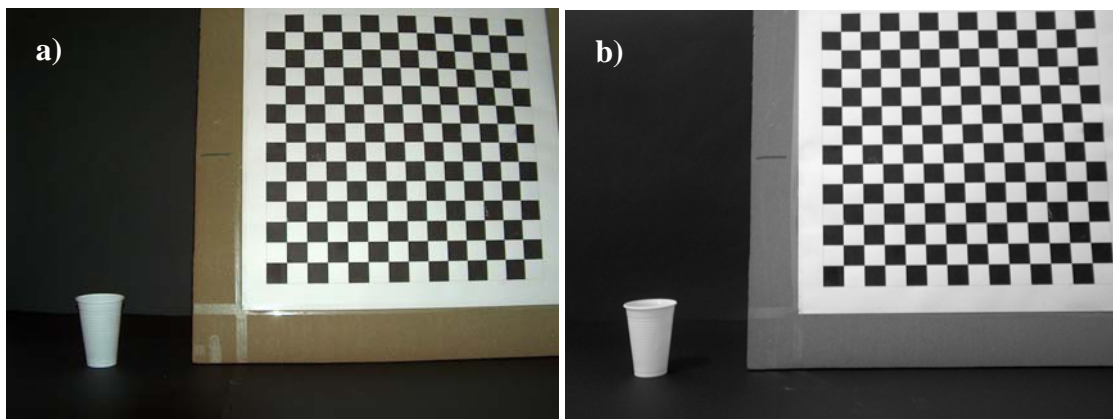


Figura 4.8 – a) Imagem com padrão calibração, b) Imagem corrigida

| Tabela 4.4 - Caso de estudo 2: parâmetros extrínsecos da imagem | | | |
|---|--------------|-------------|--------------|
| Parâmetro | Valor | | |
| Vector Translação - Tc_{ext} | [-17.170409 | -289.578444 | 976.897498] |
| Vector Rotação - omc_{ext} | [2.153436 | 2.140989 | -0.176162] |
| | [0.004908 | 0.999920 | -0.011629 |
| Matriz Rotação - Rc_{ext} | 0.988373 | -0.006618 | -0.151904 |
| | -0.151969 | -0.010748 | -0.988327] |
| Tamanho Pixel – [erx ery] | [0.30869 | 0.37163] | |

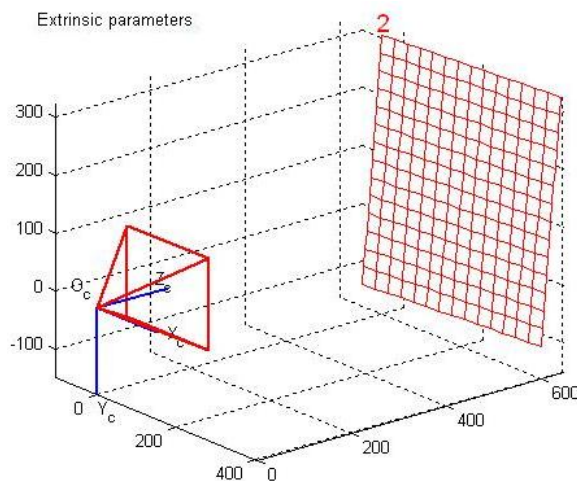
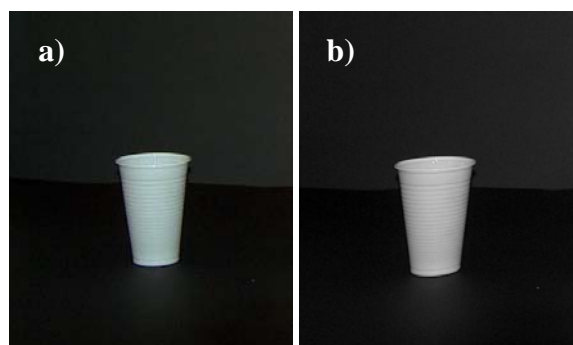


Figura 4.9 - Representação dos planos de calibração

Considerando os valores obtidos anteriormente procedeu-se à calibração da imagem do objecto como se indica na Figuras 4.10b.



Figuras 4.10 – a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração

Uma vez obtida a imagem calibrada, procedeu-se à definição da silhueta exterior do objecto tal como se indica na Figura 4.11a, representando-se a respectiva superfície na Figura 4.11b.

Os resultados mostram que o algoritmo implementado foi capaz de aproximar com algum rigor a geometria do objecto, nomeadamente a existência do rebordo no topo do copo mas mostrou-se incapaz de identificar os pequenos rasgos existentes na superfície. Tal dever-se-á à matriz de imagem utilizada, em que os pixels apresentam dimensão superior às dimensões dos rasgos. Na Figura 4.12 apresenta-se o modelo STL da superfície exterior.

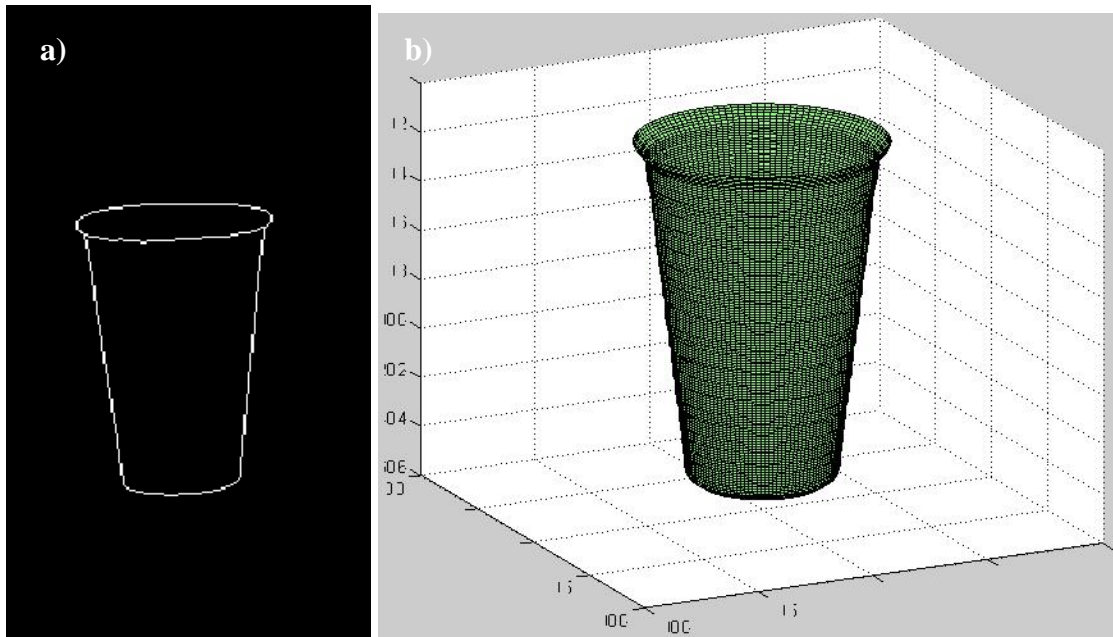


Figura 4.11 – a) Silhueta, b) Superfície exterior

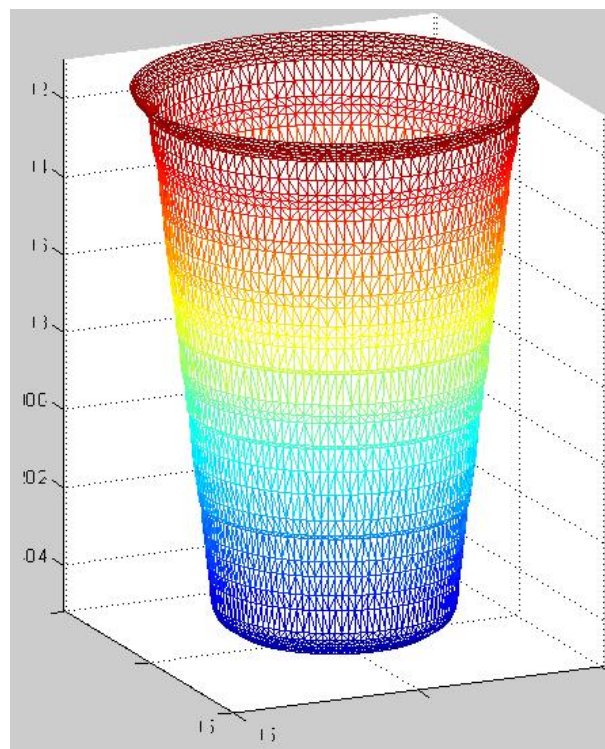


Figura 4.12 - STL da superfície exterior

Em seguida procedeu-se à obtenção da silhueta interior (Figura 4.13). Contudo, dada a reduzida dimensão da espessura, e existência do bordo que complica o processo de reconstrução utilizando apenas uma imagem, e a própria cor do objecto que não permite um grande contraste não foi possível, neste caso, a identificação da superfície interior.

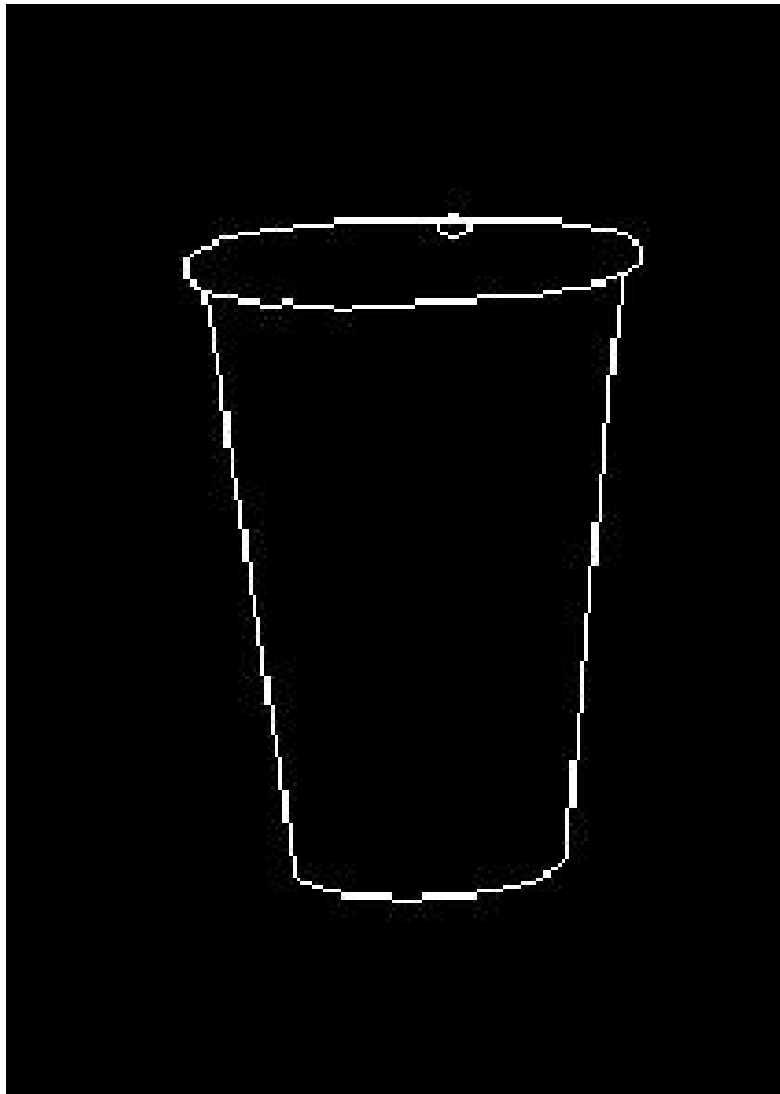


Figura 4.13 –Silhueta completa

O valor do diâmetro máximo do topo é de 38mm e de 51,5mm de altura para o objecto reconstruído. Relacionando a altura com o diâmetro, temos uma relação de 1,35 e de 1,43, para o objecto reconstruído e para o objecto real, respectivamente. Temos então uma reconstrução muito aproximada do objecto, com um erro de aproximadamente 5,59%.

4.4 Caso de estudo 3 – Cálice

O objecto considerado neste caso de estudo é um cálice, com 153 mm de altura, 60mm de diâmetro mínimo na base, 60mm de diâmetro máximo no topo e parede com espessura de 2mm. Este objecto caracteriza-se por 3 regiões distintas, uma superfície esférica no topo, um tronco cilíndrico de 10mm de diâmetro, que interliga o topo com a base. Trata-se de um objecto em vidro de cor branca sendo a superfície lisa.

Os parâmetros extrínsecos resultantes da calibração indicam-se na Tabela 4.5. Na Figura 4.14 representam-se, respectivamente, a imagem não calibrada e calibrada do objecto com o padrão de calibração. Na Figura 4.15 representam-se, respectivamente, o plano de calibração e o plano de imagem.

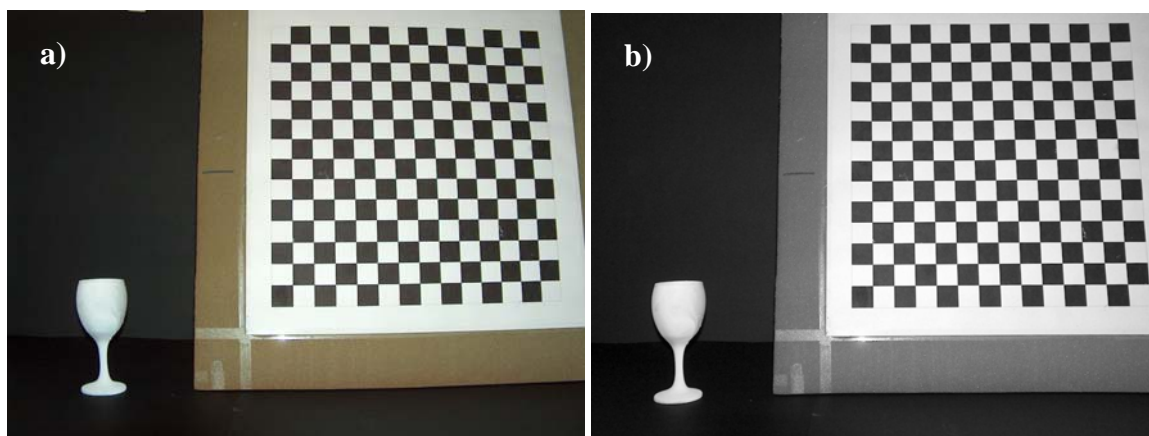


Figura 4.14 – a) Imagem com padrão calibração, b) Imagem corrigida

| Tabela 4.5 - Caso de estudo 3: parâmetros extrínsecos da imagem | | | |
|---|-------------|-------------|--------------|
| Parâmetro | Valor | | |
| Vector Translação - Tc_{ext} | [-28.931504 | -276.072703 | 981.311079] |
| Vector Rotação - omc_{ext} | [2.141474 | 2.125869 | -0.176832] |
| | [0.007384 | 0.999972 | 0.000845 |
| Matriz Rotação - Rc_{ext} | 0.986090 | -0.007142 | -0.166058 |
| | -0.166048 | 0.002060 | -0.986116] |
| Tamanho Pixel – [erx ery] | [0.32186 | 0.35920] | |

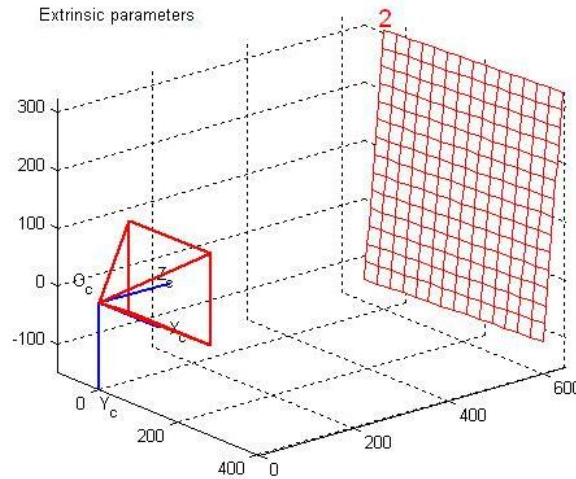


Figura 4.15 - Representação dos planos de calibração

Considerando os valores obtidos anteriormente procedeu-se à calibração da imagem do objecto como se indica na Figura 4.16b.

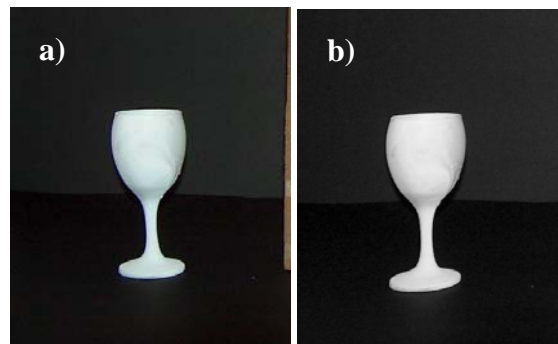


Figura 4.16 – a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração

Uma vez obtida a imagem calibrada, procedeu-se à definição da silhueta exterior do objecto tal como se indica na Figura 4.17a, representando-se a respectiva superfície na Figura 4.17b.

Os resultados mostram que o algoritmo implementado foi capaz de aproximar com algum rigor a geometria do objecto, nomeadamente a existência do tronco cilíndrico e da base. Na Figura 4.18 apresenta-se o modelo STL da superfície exterior.

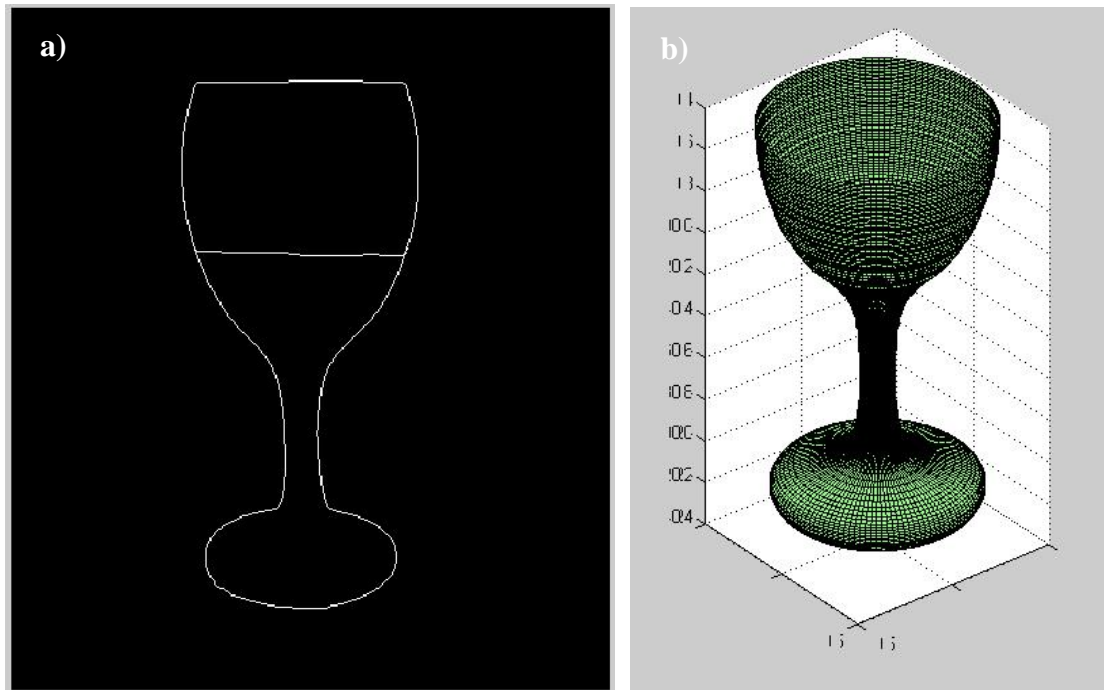


Figura 4.17 –a) Silhueta, b) Superfície exterior

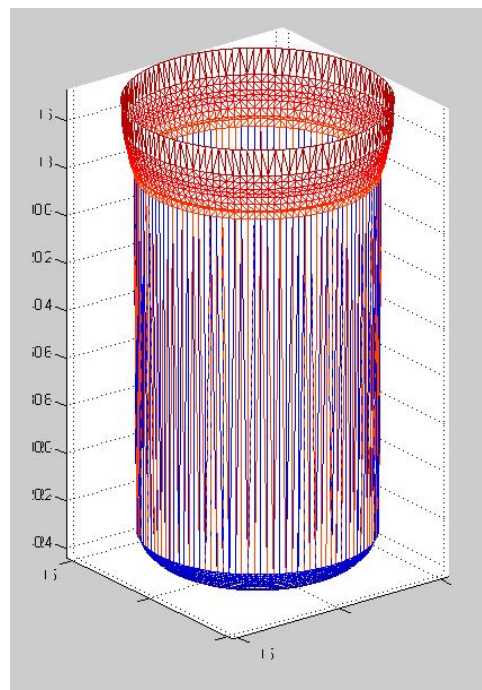


Figura 4.18 - STL da superfície exterior

Do STL da superfície exterior representada na Figura 4.18, temos a salientar que, apesar da representação conter algumas irregularidades, estas existem apenas na representação, pois a informação em formato STL está ajustada à superfície exterior da Figura 4.17b, como se pode ver na Figura 4.19, com a representação da nuvem de pontos do objecto reconstruído.

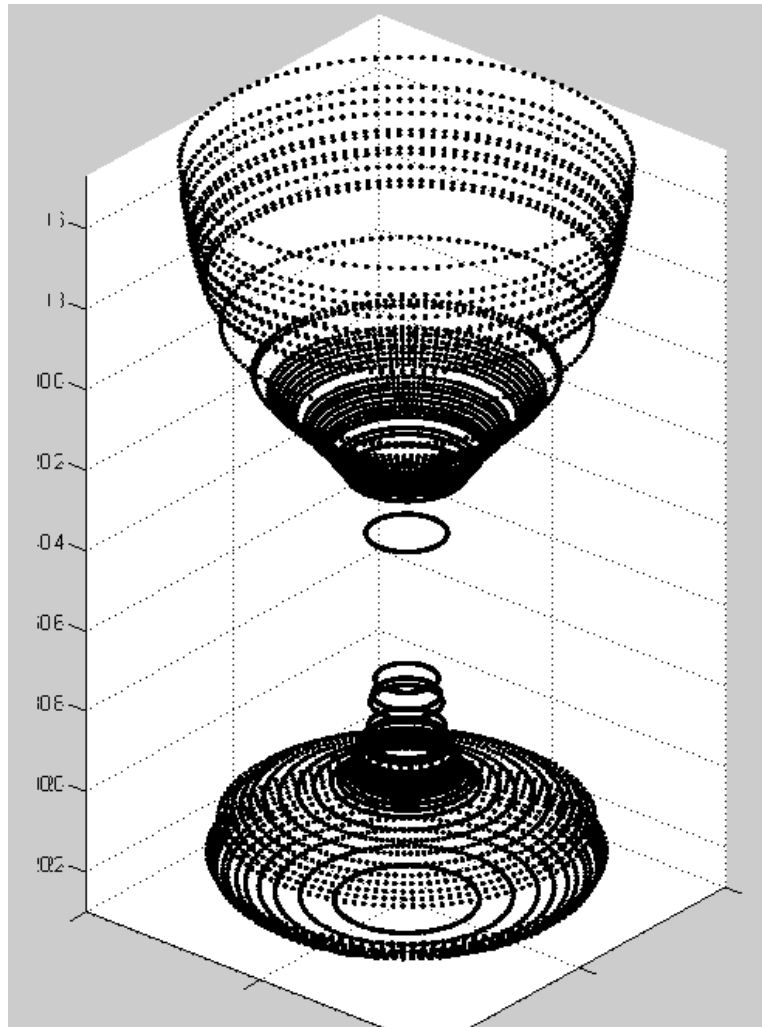


Figura 4.19 - Representação da nuvem de pontos da reconstrução

Em seguida procedeu-se à obtenção da silhueta interior (Figura 4.20). Contudo dada a posição relativa da câmara em relação ao objecto não é possível obter o contorno interior do objecto. A correcta representa do objecto implicaria a alteração dos parâmetros da câmara pois teríamos de deslocar esta, tendo necessidade nova determinação de parâmetros.

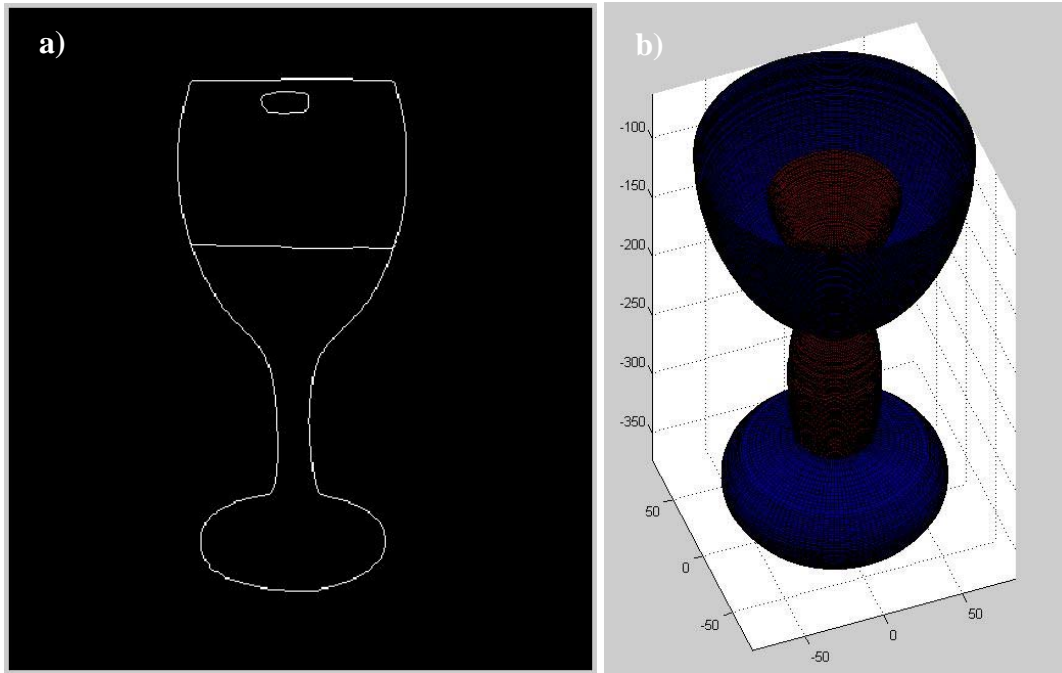


Figura 4.20 – a) Silhueta completa, b) Superfície total

O valor do diâmetro máximo do topo é de 53mm e de 121mm de altura para o objecto reconstruído. Relacionando a altura com o diâmetro, temos uma relação de 2,49 e de 2,55, para o objecto reconstruído e para o objecto real, respectivamente. Temos então uma reconstrução muito aproximada do objecto, com um erro de aproximadamente 2,35%.

4.5 Caso de estudo 4 – Vaso de cor vermelha

O objecto considerado neste caso de estudo é um vaso, com 120 mm de altura, 95mm de diâmetro mínimo na base, 130mm de diâmetro máximo no topo e parede com espessura de 6mm. Este objecto caracteriza-se pelo tronco ligeiramente cónico invertido, em cerâmica de cor vermelha e tendo na superfície rasgos transversais.

Os parâmetros extrínsecos resultantes da calibração indicam-se na Tabela 4.6. Na Figura 4.21 representam-se respectivamente a imagem não calibrada e calibrada do objecto com o padrão de calibração. Na Figura 4.22 representam-se respectivamente o plano de calibração e o plano de imagem.

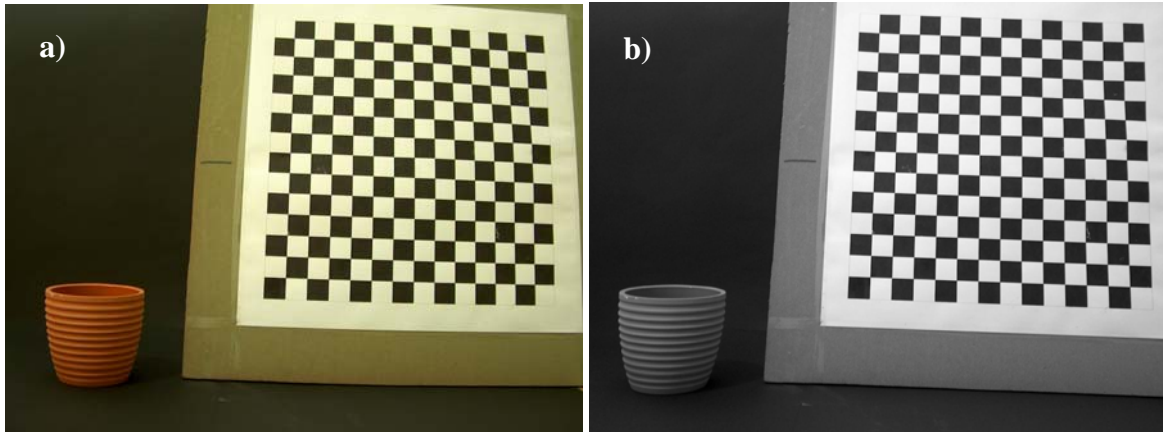


Figura 4.21 – a) Imagem com padrão calibração, b) Imagem corrigida

| Tabela 4.6 - Caso de estudo 4: parâmetros extrínsecos da imagem | | | |
|---|--------------|-------------|--------------|
| Parâmetro | Valor | | |
| Vector Translação - T_{c_ext} | [-18.715001 | -275.802625 | 979.227487] |
| Vector Rotação - o_{mc_ext} | [2.093682 | 2.172927 | -0.181237] |
| | [-0.036935 | 0.999315 | 0.002356 |
| Matriz Rotação - R_{c_ext} | 0.985117 | 0.036806 | 0.167900 |
| | -0.167871 | -0.003880 | -0.985801] |
| Tamanho Pixel – [erx ery] | [0.32773 | 0.37057] | |

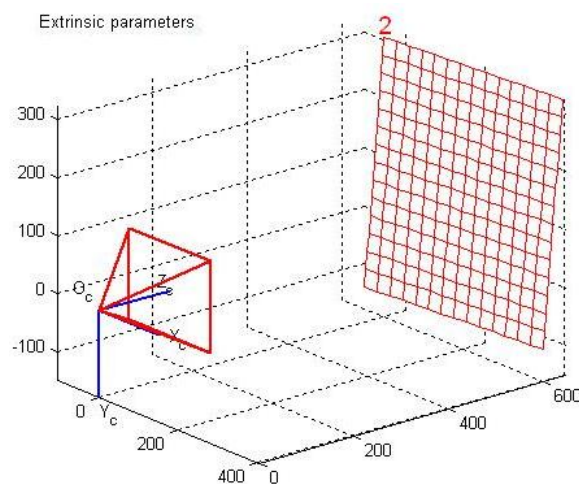


Figura 4.22 - Representação dos planos de calibração

Considerando os valores obtidos anteriormente procedeu-se à calibração da imagem do objecto como se indica na Figura 4.23b.

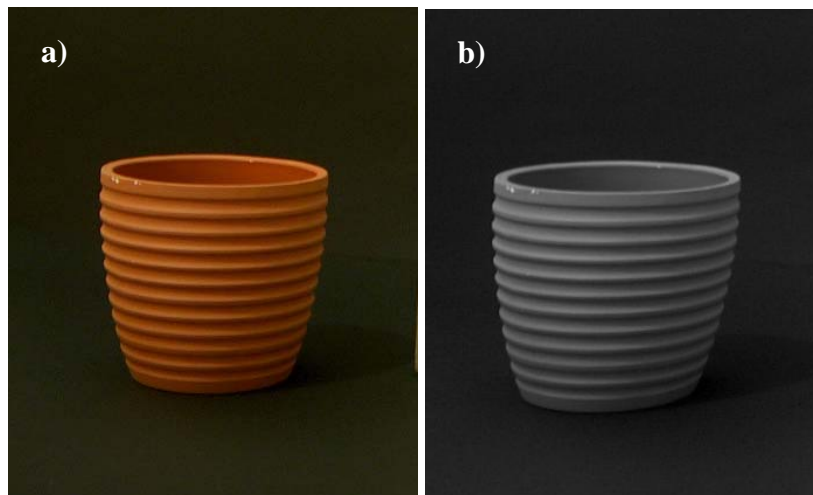


Figura 4.23 – a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração

Uma vez obtida a imagem calibrada, procedeu-se à definição da silhueta exterior do objecto tal como se indica na Figura 4.24a, representando-se a respectiva superfície na Figura 4.24b.

Os resultados mostram a eficácia do algoritmo implementado, pois este foi capaz de aproximar com algum rigor a geometria do objecto, nomeadamente a existência do tronco cilíndrico e da base. Na Figura 4.25 apresenta-se o modelo STL da superfície exterior.

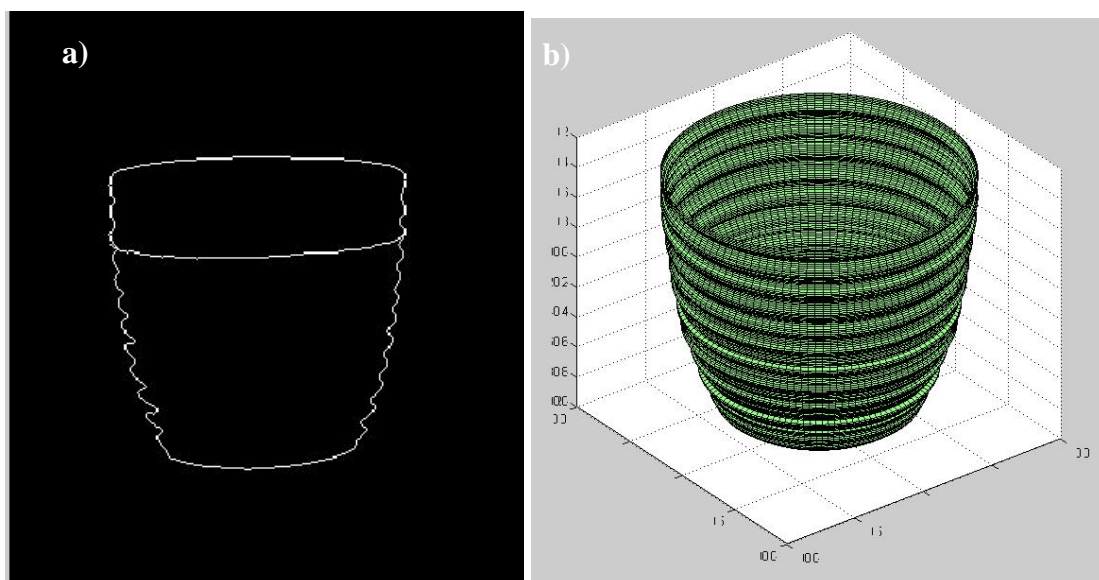


Figura 4.24 – a) Silhueta exterior , b) Superfície exterior

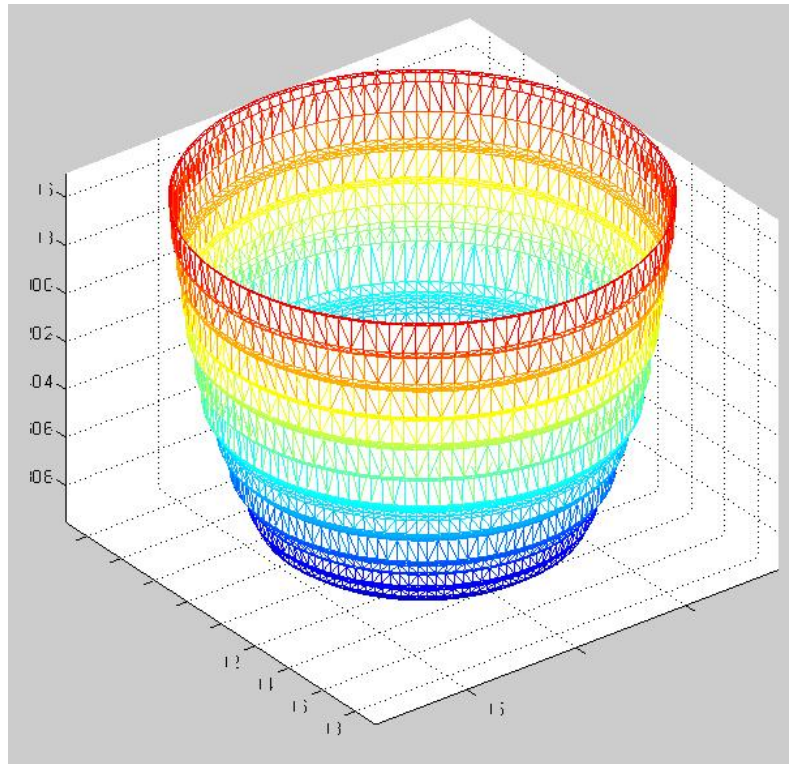


Figura 4.25 - STL da superfície exterior

Em seguida procedeu-se à obtenção da silhueta interior, Figura 4.26a). Contudo dada a posição relativa da câmara em relação ao objecto não é possível obter o contorno interior do objecto. A correcta representação do objecto implicaria a alteração dos parâmetros da câmara pois teríamos de a deslocar, tendo necessidade de nova determinação de parâmetros.

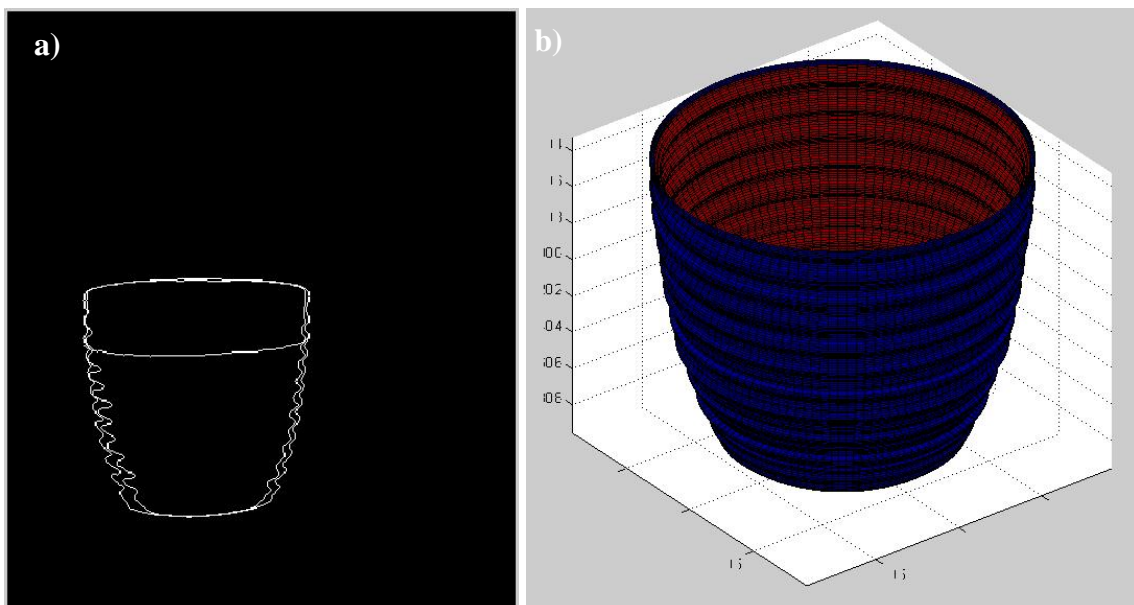


Figura 4.26 – a) Silhueta completa, b) Superfície total

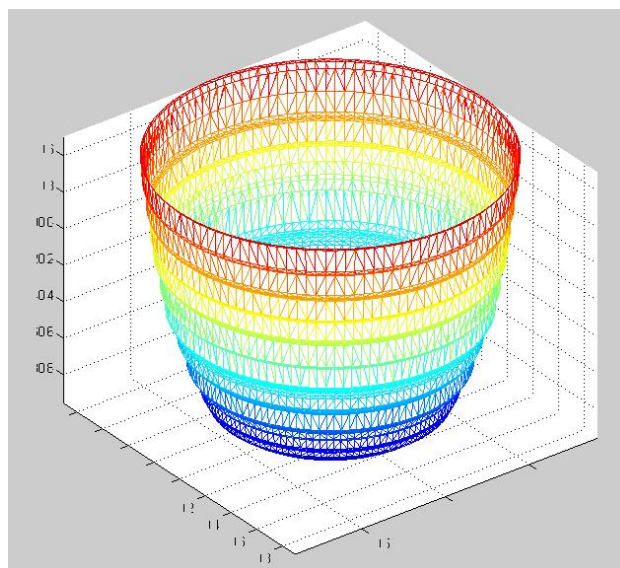


Figura 4.27 - STL da superfície interior

Conforme se visualiza na imagem anterior, Figura 4.26, as silhuetas exterior e interior, são similares, apesar de no objecto a superfície interior ser uniformemente lisa. Esta situação resulta do próprio algoritmo.

De acordo com a forma como algoritmo foi estruturado, uma vez definida a superfície exterior do objecto e respectiva aproximação STL, procedeu-se à definição da superfície interior seguindo os passos descritos anteriormente, isto é, identificação da silhueta interior e exterior, Figura 4.26a), definição da superfície interior e exterior, Figura 4.26b), criação do modelo STL da superfície interior, Figura 4.27 e finalmente a combinação da informação correspondente à superfície exterior e interior do objecto. Todas estas etapas ocorreram usando-se a mesma imagem calibrada.

O valor do diâmetro máximo do topo é de 80mm e de 67mm de altura para o objecto reconstruído. Relacionando a altura com o diâmetro, temos uma relação de 1,05 e de 1,08, para o objecto reconstruído e para o objecto real, respectivamente. Temos então uma reconstrução muito aproximada do objecto, com um erro de aproximadamente 2,77%.

4.6 Caso de estudo 5 – Caneca de cor branca

O objecto considerado neste caso de estudo é uma caneca, com 120 mm de altura, 65mm de diâmetro mínimo na base, 105mm de diâmetro máximo no topo e parede com espessura de 3mm. Este objecto caracteriza-se pela forma ligeiramente cónica por possuir um “bico” e uma “pega”, conforme parcialmente visível. Com este objecto pretende-se testar a versatilidade do algoritmo e perspectivar eventuais desenvolvimentos futuros como sendo a integração de pormenores técnicos, tais como “pegas”, “bicos”, “orelhas” e/ou técnicos, por exemplo, escatéis no caso de veios de transmissão.

Os parâmetros extrínsecos resultantes da calibração indicam-se na Tabela 4.7. Na Figura 4.27 representam-se, respectivamente, a imagem não calibrada e calibrada do objecto com o padrão de calibração. Na Figura 4.28 representam-se, respectivamente, o plano de calibração e o plano de imagem.

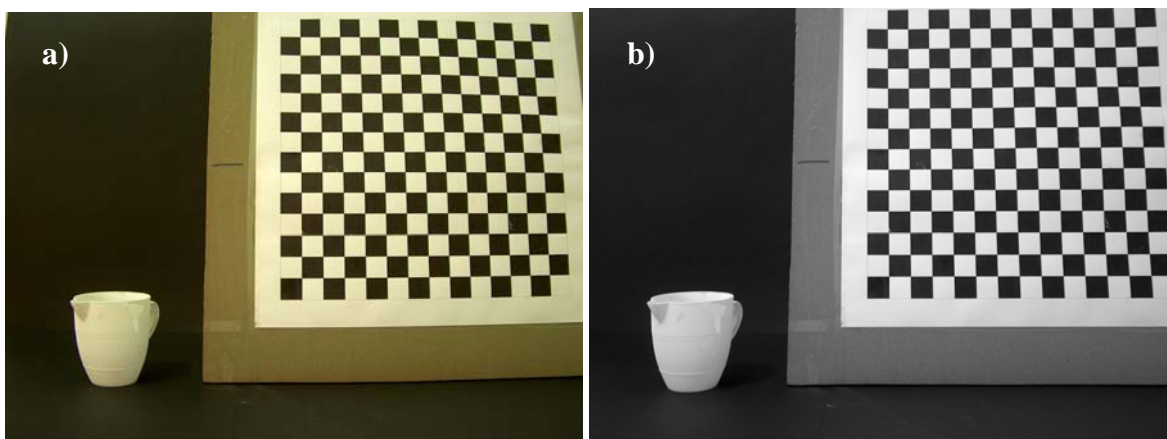


Figura 4.28 - a) Imagem separada do padrão, b) Imagem após calibração

| Tabela 4.7 - Caso de estudo 5: parâmetros extrínsecos da imagem | | | |
|---|--------------|-------------|--------------|
| Parâmetro | Valor | | |
| Vector Translação - Tc_{ext} | [-11.362237 | -289.532385 | 977.869279] |
| Vector Rotação - omc_{ext} | [2.152638 | 2.145977 | -0.182356] |
| Matriz Rotação - Rc_{ext} | [0.001831 | 0.999862 | -0.016540 |
| | 0.988316 | -0.004331 | -0.152356 |
| | -0.152406 | -0.016068 | -0.988187] |
| Tamanho Pixel – [erx ery] | [0.31284 | 0.36821] | |

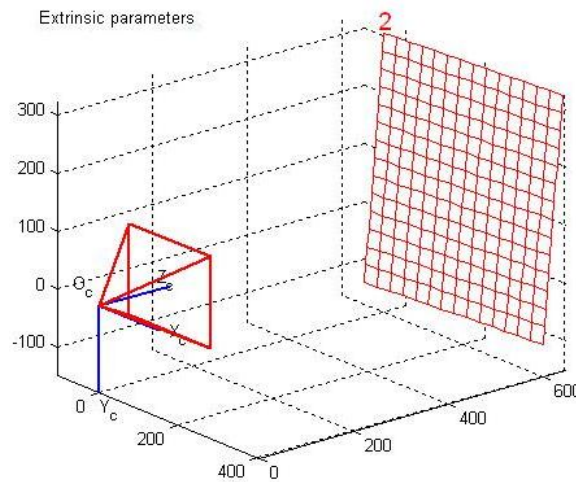


Figura 4.29 - Representação dos planos de calibração

Considerando os valores obtidos anteriormente procedeu-se à calibração da imagem do objecto como se indica na Figura 4.29b.

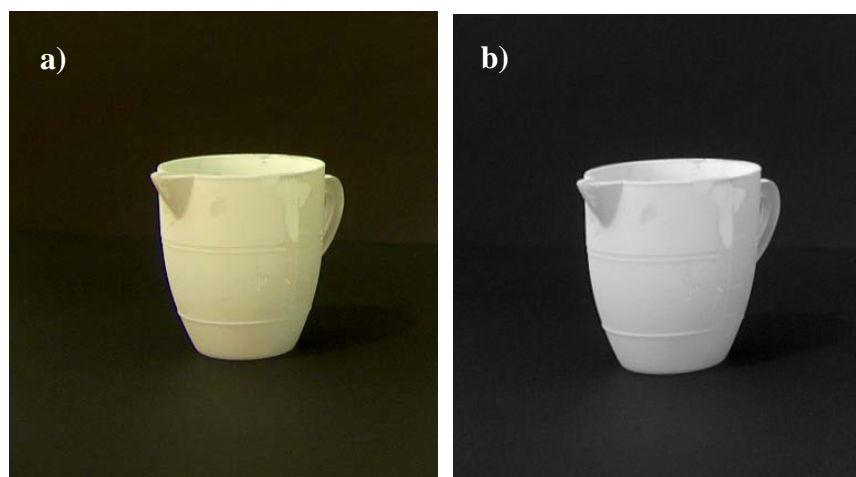


Figura 4.30 - a) Imagem separada do padrão antes calibração, b) Imagem após calibragem

Partindo da imagem calibrada, Figura 4.28b), do objecto e submetendo-a ao algoritmo, vamos obter como resultado a silhueta exterior do objecto, Figura 4.31a). De salientar que na imagem é possível verificar parte de alguns elementos do objecto em análise, nomeadamente, o “bico” e a “pega” da caneca, apesar de estes não serem totalmente perceptíveis.

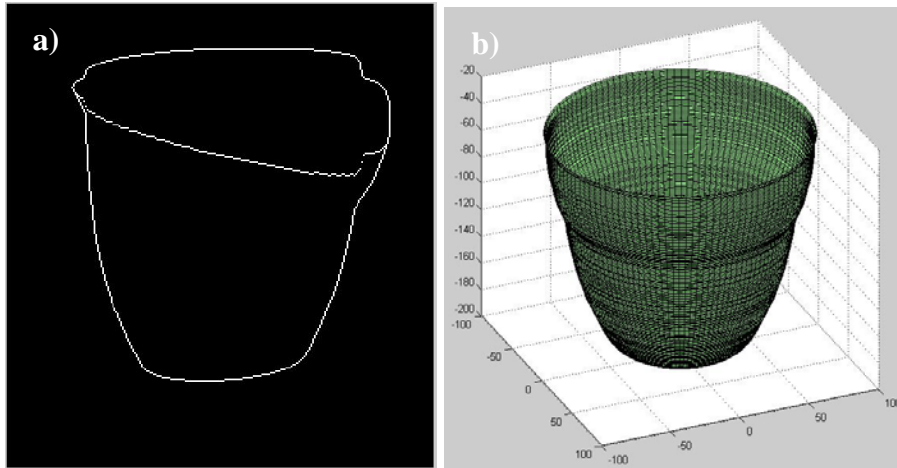


Figura 4.31 - a) Silhueta Exterior, b) Superfície Exterior

Na imagem seguinte, Figura 4.32, poderemos visualizar a superfície exterior reconstruída do objecto, em formato STL.

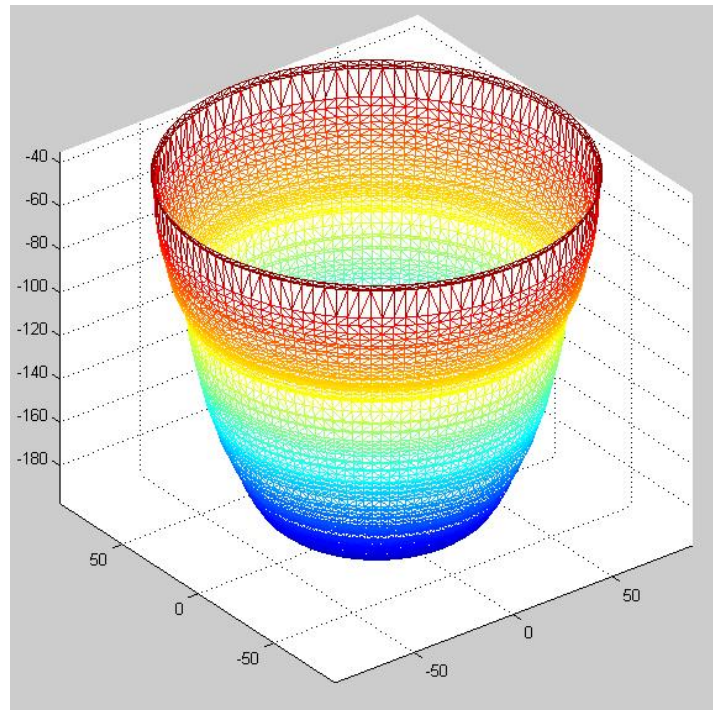


Figura 4.32 - STL da superfície exterior

Das imagens seguintes temos a salientar a dificuldade do algoritmo em encontrar a silhueta correcta. Na imagem da Figura 4.33b, estão representadas as duas superfícies, a azul está representada a superfície exterior, a vermelho está representada a superfície interior. Apesar da silhueta, imagem da Figura 4.33a, não se ajustar da melhor forma à real silhueta, a superfície exterior obtida aproxima-se da silhueta do objecto real.

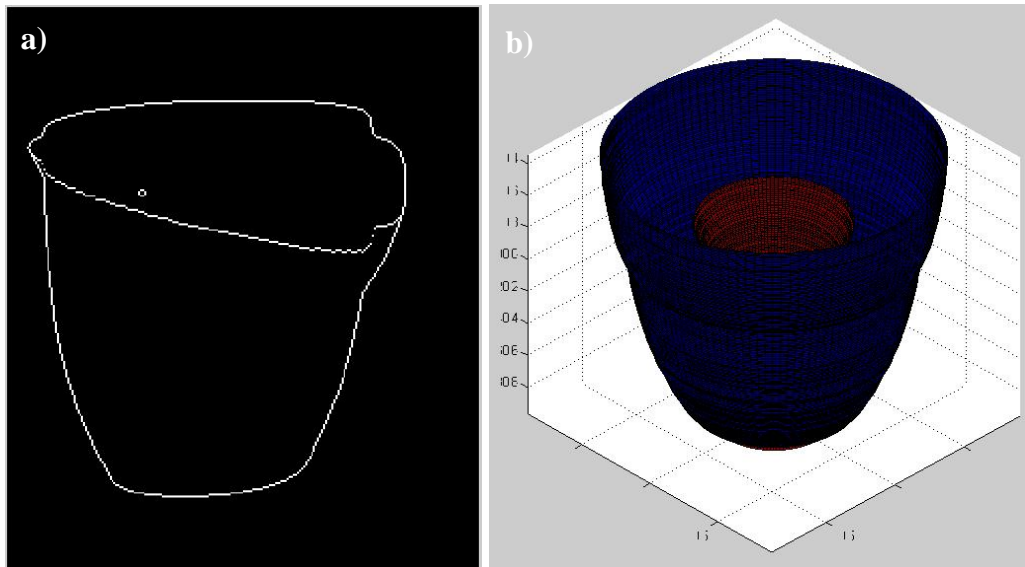


Figura 4.33 - a) Silhueta completa, b) Superfície total

No resultado não foi possível obter a superfície interior, esta situação ficou a dever-se á incorrecta obtenção da silhueta interior, isto é, à não correspondência da silhueta interior com a do objecto.

O valor do diâmetro máximo do topo é de 115mm e de 143mm de altura para o objecto reconstruído. Relacionando a altura com o diâmetro, temos uma relação de 1,24 e de 1,14, para o objecto reconstruído e para o objecto real, respectivamente. Temos então uma reconstrução muito aproximada do objecto, com um erro de aproximadamente 8,77%.

4.7 Resumo resultados

De seguida apresentamos uma tabela resumo com os resultados obtidos para os cinco casos de estudo, Tabela 4.8.

| Tabela 4.8 – Tabela resumo dos resultados | | | | | | |
|---|----------|--------|--------|--------|-----------|----------|
| Parâmetro | Objecto | Ø Topo | Ø Base | altura | Espessura | Erro (%) |
| Caso estudo 1 | Real | 142 | 115 | 48 | 2,2 | 6,60 |
| | Reconst. | 78 | | 25 | 1,5 | |
| Caso estudo 2 | Real | 69 | 43 | 99 | 1 | 6,06 |
| | Reconst. | 38 | | 51,5 | | |
| Caso estudo 3 | Real | 60 | 60 | 153 | 2 | 2,35 |
| | Reconst. | 53 | | 121 | | |
| Caso estudo 4 | Real | 130 | 95 | 120 | 6 | 2,77 |
| | Reconst. | 80 | | 67 | 4,9 | |
| Caso estudo 5 | Real | 105 | 65 | 65 | 3 | 8,77 |
| | Reconst. | 115 | | 143 | | |

Nota: valores de algumas características dos objectos, expressos em mm.

A característica Erro foi obtida através da seguinte expressão:

$$Erro(\%) = 1 - \frac{\frac{Altura_{reconstruido}}{Diametro_{reconstruido}^{Topo}}}{\frac{Altura_{real}}{Diametro_{real}^{Topo}}}$$

Esta expressão relaciona, a altura do objecto com o seu diâmetro máximo no topo, entre o objecto reconstruído e o objecto real. De salientar, que dos resultados obtidos, todos os valores de erro se encontram abaixo de 10 %. O que nos permite concluir que o objecto reconstruído se aproxima do objecto real, tendo o algoritmo implementado uma boa replicabilidade.

CAPITULO 5

CONCLUSÕES E

TRABALHOS FUTUROS

A tecnologia da engenharia inversa tem sido largamente aplicada e estudada do ponto de vista de aplicações no domínio da engenharia mecânica. Desenvolvimentos recentes em termos de *hardware* dos equipamentos e do *software* usado, tem vindo a transformar a Engenharia Inversa numa tecnologia cada vez mais poderosa e sofisticada. Contudo, os sistemas convencionais descritos detalhadamente no Capítulo 2, apresentam importantes limitações em termos de flexibilidade e versatilidade. Tradicionalmente, os processos de digitalização e reconstrução de objecto tridimensionais utilizam sofisticadas técnicas de varrimento por laser ou por contacto, que embora se revelem precisos para objectos planos, não o são no caso de objectos possuindo superfícies curvas ou descontínuas. Para além disso, revelam pouca eficiência e rapidez quando se digitalizam objectos de geometria complexa, como são, regra geral, a grande maioria dos objectos usados em Engenharia Mecânica. Finalmente, apresentam importantes limitações em termos de flexibilidade assim como em termos das dimensões dos objectos a digitalizar, o que inviabiliza a sua utilização em áreas como a Engenharia Automóvel, a Engenharia Civil, a Arquitectura, a Arqueologia, etc.

Este trabalho de investigação, visa contribuir em parte para a solução deste problema através do desenvolvimento de uma metodologia de geração automática de modelos computacionais a partir de utilização de uma única imagem fotográfica. Tal passa pela definição de algoritmos robustos que permitam a obtenção de um sistema mais rápido e eficiente. O algoritmo desenvolvido baseia-se em princípios da visão, muito embora se baseie num única imagem fotográfica o que não acontece com a visão humana em que a construção visual requer a utilização de duas imagens ligeiramente diferentes do mesmo objecto observado. Neste sentido o trabalho desenvolvido assenta numa aproximação que designamos por biomimética.

O processo de procurar na natureza soluções para problemas que se nos colocam constantemente nas nossas actividades de engenharia designa-se por biomimética. Este conceito, surgiu pela primeira vez anos 1960, e tem conhecido recentemente um grande desenvolvimento. Se pensarmos nos modernos sistemas de Engenharia Inversa destinados à produção de replicas computacionais numa perspectiva biomimética, podemos afirmar que o computador, funcionando com o cérebro desse sistema, está dotado de uma importante característica sensorial que é o tacto. Efectivamente, como as mãos de um cego

permitem, ao tactarem um objecto, a construção mental da sua imagem, também os sistemas convencionais de digitalização por contacto funcionam como instrumentos que ao percorrerem as superfícies de um objecto permitem a geração “mental” em computador da sua imagem. Contudo, a capacidade que os humanos têm de interagir deve-se ao facto de serem possuidores de outras capacidades sensoriais para além do tacto. Neste sentido a visão assume uma particular importância pois permite-nos olhar directamente o espaço e os objectos que nos rodeiam. O algoritmo desenvolvido e descrito de forma detalhada no Capítulo 3 compreende quatro etapas fundamentais: a aquisição de imagem que corresponde à fase de iniciação do processo de reconstrução, a etapa de processamento envolvendo operações de calibração, binarização e suavização e destinada à geração de informação adequada à reconstrução tridimensional, a etapa de optimização dos parâmetros de binarização e a etapa de modelação.

Este sistema caracteriza-se por:

- Fácil obtenção de silhuetas utilizando um reduzido número de imagens. No presente caso usaram-se 10 imagens para a calibração (duas imagens por cada objecto de estudo) e uma imagem para a definição da silhueta (ver Capítulo 4),
- Ter algoritmo automático, no que diz respeito à optimização dos parâmetros para tratamento da imagem,
- Os parâmetros para tratamento de imagens poderem ser facilmente ajustados pelo utilizador. O efeito da alteração destes parâmetros sobre a imagem é rapidamente visualizado,
- Versatilidade no que toca aos tamanhos e formatos de entrada de imagens sendo possível o tratamento de imagens em formato jpeg, tiff, bmp, gif, etc. O sistema detecta automaticamente o tamanho da imagem e opera com a imagem no respectivo tamanho,
- Rapidez de processamento e obtenção de informação 3D,
- Os erros são inferiores a 10%, tratando-se de resultados teóricos, sendo necessário a comprovação experimental posterior.

Trata-se de um sistema pensado para objectos de revolução, uma vez que opera com uma única imagem fotográfica. Esta característica pode constituir uma importante limitação como foi possível observar com o caso de estudo 5 (ver Capítulo 4), que apresentava pegas e bicos, isto é, desvios à característica axissimétrica que os objectos devem ter. Outras

importantes limitações que o sistema revela e que importa solucionar em trabalhos futuros são:

- grande sensibilidade a alterações nos parâmetros da binarização,
- dificuldade na obtenção da espessura para objectos de paredes finas.

No processo de calibração utilizou-se um padrão cujas dimensões são substancialmente maiores que os objectos analisados. Tal poderá justificar o facto de existirem alguns detalhes não identificados no processo de reconstrução. Futuramente dever-se-á utilizar um padrão de menores dimensões e verificar-se qual o seu efeito em termos de resultados finais. Para além destes aspectos, o trabalho desenvolvido abriu portas a múltiplos outros trabalhos que deverão ser realizados no futuro, nomeadamente:

- estabelecer a ligação entre o sistema e a prototipagem rápida de modo a avaliar-se experimentalmente o rigor dimensional que o sistema permite,
- dotar o sistema de capacidade para incluir detalhes técnicos em objectos de revolução com uma fotografia adicional do detalhe e junção automática, através da definição de um procedimento tipo puzzle. Neste caso, o tratamento de modelos mais ou menos complexos será sempre efectuado através procedimentos mono imagem,
- definir modelos matemáticos de correlação entre os parâmetros, de modo a dar-se indicação ao utilizador de quais os valores óptimos e respectivo efeito sobre o objecto a reconstruir,
- implementação de um modelo de calibração automático (self-calibration).
- definição de modelos digitais por reconhecimento de objectos em movimento para controlo de qualidade,
- capacidade para inferir características de materiais e desvios de processamento.

O trabalho desenvolvido no decorrer deste estudo deu origem às seguintes publicações:

1. *AGILE-CAD for Reverse Engineering*, Ferreira, R., Leal, I., Alves, N.M., Bártolo, P.J., *Virtual and Rapid Manufacturing*, Editado por P.J. Bártolo et al, Taylor & Francis, 2007 (ISBN: 04 154 16027)
2. *Automatic Reconstruction of Axisymmetric Objects*, Ferreira, R., Leal, I., Alves, N.M., Bártolo, P.J., RPD2008, Novembro, 2008 (aceite)

Referências

Aloimonons, Y.(1990), *Purposive and Qualitative Active Vision*, Proceedings on 10th International Conference on Patern Recognition, Atlantic City.

Alves, N. (2006), *New Image-Based System For Reverse Engineering Applied to CAD/CAM/CAE and RP/RT*, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica Lisboa, Lisboa.

Bártolo, P. (2001), *Optical Approaches to Macroscopic and Microscopic Engineering*, Tese de Doutoramento, Universidade Reading, UK.

Bártolo, P., Alves, N., Mateus, A., Merino A., Rodriguez G. (2004), *Técnicas Avançadas de Produção: - A Integração Entre Engenharia Inversa e Prototipagem Rápida*, ESTG, IP Leiria.

Bajcsy, R.(1985), *Active Perception vs. Passive Perception*, In Proceedings of IEEE Workshop on Computer Vision, Bellair , MI.

Bibanda, B., Motavalli, S., Harding K. (1991), *Reverse engineering: an evaluation of prospective non-contact technologies and applications in manufacturing systems*, Int. J. Computer Integrated Manufacturing, Vol. 4, No 3, pp. 145-156.

Bianchi, R.A. (2001), *Visão computacional aplicada ao controle de micro robôs*, Relatório técnico, Centro universitário da FEI, São Bernardo do Campo, Brasil.

Canny, J. F. (1983), *Finding Edges and Lines in Images*, M.I.T Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge Ma.

Canny, J. F. (1986), *A Computational Approach to Edge Detection*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 6, Pp. 679-698, November.

Chang, C., Chiang, H. (2003), *Three-dimensional Image Reconstructions of Complex Objects by an Abrasive Computed Tomography Apparatus*, International Journal of advanced Manufacturing Technology, 22, pp. 708-712.

Chang, C., Lee, M. Y., Wang, S. H. (2006), *Digital denture manufacturing-An integrated technologies of abrasive computer tomography, CNC machining and rapid prototyping*, International Journal of advanced Manufacturing Technology, 31, pp. 41-49.

Coord3 (2007), sistema de cantilever, <URL>
www.coord3.com/web/en/cmm/cantilever/trw.html pagina acedida em Janeiro de 2007.

Desai, S., Bidanda, B. (2006), *Reserve Engeneering: A review & Evaluation of Contact Based Systems*, Rapid Prototyping-Theory and Practice, Editado por A. K. Kamrani e E. A. Nasr, Kluwer.

Gibson, J. (1950), *The Perception of Virtual World*, Houghton-Mifflin.

Globalspec (2006), CMM's, <URL> www.globalspec.com (pagina acedida em Dezembro 2006).

Gokmen, M., Ching-Chung, L. (1993), *Edge Detection and Surface Reconstruction Using Refined Regularization*, IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 5, May.

Hassanpour, R., Atalay, V. (2004), *Delaunay Triangulation Based 3D Human Face Modeling From Uncalibrated Images*, Proceedings of 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Patern Recognition, pp. 74-75.

Hoffman, Eric A., Chon, D. (2005), *Computed Tomography Studies of Lung Ventilation and Perfusion*, Proceedings of the American Thoracic Society , Vol. 2, pp. 492-498.

Hou, Z., Hu, Q., Nowinski, W.L. (2006), *On Minimum Variance Thresholding*, Elsevier, Pattern Recognition Letters 27, pp. 1732–1743.

Houndfield, G. (1973), *Computerized Tranversal Axial Scaning (Tomography). Description of system*, The British Journal of Radiology, vol. 46, No. 552, pp. 1016-1022.

Hounsfield (2007), Tabela de valores usuais de diversas substâncias, <URL> http://en.wikipedia.org/wiki/Hounsfield_scale, pagina acedida em Janeiro 2007.

Hui-Fuang, Ng. (2006), *Automatic Thresholding For Defect Detection*, Elsevier, Pattern Recognition Letters 27, pp. 1644–1649.

Jackson, S., Thomas, R. (2004), *Cross-Sectional Imaging Made Easy*, Churchill Livingstone, 2004.

Kinahan, P. E., Hasegawa, B. H., Beyer, T. (2003), *X-Ray-Based Attenuation Correction for Positron Emission Tomography/Computed Tomography Scanners*, Seminars in Nuclear Medicine, Vol XXXIII, No 3 (July), pp. 166-179.

Kumar, K.S., Babu, A.V., Seetharamu, K.N., Sundararajan, T., e Narayana, P.A. (1997), *A generalized Delaunay Triangulation Algoritm With Adaptive Grid Size Control*, Communications in Numerical Methods en Engineering, 13, pp. 941-948.

Lopez, A., Molina, R., Katsaggelos, A.K., Mateos, J. (2001), *SPECT image reconstruction using compound models*, icassp, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 3, pp. 1909-1912.

Lucchese, L. (2005), *Geometric calibration of digital cameras through multi-view rectification*, Image and Vision Computing, Elsevier, Volume 23, Issue 5, pp. 517-539, May.

Luong, Q.T., Faugeras, O. (1997), *Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices*, The International Journal of Computer Vision, 22(3), pp. 261-289.

Marr, D. (1982), *Vision WHfreeman*.

- Metalforming (2007), sistema de braço articulado, revista Metalforming, Agosto 2003, <URL> <http://archive.metalformingmagazine.com/2003/08/CMMs.pdf> (pagina acedida a Janeiro 2007).
- Otsu, N. (1979), *A Threshold Selection Method From Gray-Level Histograms*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 9, no. 1, pp. 62-66.
- Reni, A. (2001), *Integration analysis and design improvement in reverse engineering framework*, International Conference on Engineering Education, 24-31.
- Spielman, D. A., Teng, S. H. (2004), *Smoothed Analysis of Algorithms: Why the Simplex Algorithm Usually Takes Polynomial Time*, Journal of ACM, 51, 385-463.
- Varady T., Martin R.R., Cox J. (1997), *Reverse engineering of geometric models - an introduction*, Computer Aided Design, 29 (4), 255-268.
- Wenzel (2007a), sistema de ponte, <URL> www.wenzel-cmm.com/english/lh.php3 (pagina acedida em Janeiro 2007)
- Wenzel (2007b), sistema de gantry, <URL> www.wenzel-cmm.com/english/lhg.php3 (pagina acedida em Janeiro 2007).
- Yang, G.-Z., Firmin, D.N. (2000), *The Birth of the First CT Scanner*, Imperial College of Science, Technology, & Medicine, IEEE - ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY, January/February, pp. 120-125.
- Zhang, Z. (2002), *A Flexible New Technique For Camera Calibration*, Technical Report MSR, Microsoft Corporation, Redmond.
- Zhao, Y., Thai, F. E., Chau, F. S., e Zhaou, G. (2005), *A nonlinearity compensation approach based on Delaunay triangulation to linearize the scanning field of dual-axis micromirror*, J. Micromech Microeng, 15, 1972-1978.
- Xie, H., Li, G., Ning, H., Ménard, C., Coleman, C. N., Miller, R. W. (2004), *3D Voxel Fusion of Multi-modality Medical Images in a Clinical Treatment Planning System*, Radiation Oncology Branch, National Cancer Institute, National Institutes of Health, Proceedings of the 17th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems.