

Aquisição e Processamento de Imagens de Microscopia em Balística Forense

Tiago Miguel Barbosa Mota

Tese submetida ao Instituto Superior de Engenharia do Porto
para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia de Computação e Instrumentação Médica

Orientador no ISEP

PROF. DOUTOR CARLOS VINHAIS
Departamento de Física – Instituto Superior de Engenharia do Porto
Instituto Politécnico do Porto

Orientador no INMLCF, I.P.

PROF. DOUTOR AGOSTINHO SANTOS
Departamento de Medicina Legal – Faculdade de Medicina da Universidade do Porto
Instituto Nacional de Medicina Legal e Ciências Forenses, I.P. Delegação Norte

Porto, 13 de Setembro de 2013

Agradecimentos

Para a realização deste trabalho, contei com a colaboração de diversas pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a obtenção da presente dissertação. Agradeço profundamente a todas elas.

Quero agradecer em particular ao meu orientador, Prof. Doutor Carlos Vinhais, pelas sugestões fundamentais á elaboração deste trabalho, pela sua disponibilidade e também, pelos ensinamentos e conselhos dados durante todo o mestrado.

O meu obrigado ao Prof. Doutor Agostinho Santos por todo o auxílio prestado durante o tempo de permanência no INMLCF, I.P., pelo seu interesse no trabalho desenvolvido e pela sua disponibilidade.

Por último, não posso deixar de manifestar o meu apreço pelo constante apoio da minha família, namorada e colegas.

Resumo

As novas tecnologias aplicadas ao processamento de imagem e reconhecimento de padrões têm sido alvo de um grande progresso nas últimas décadas. A sua aplicação é transversal a diversas áreas da ciência, nomeadamente à área da balística forense. O estudo de evidências (invólucros e projéteis) encontradas numa cena de crime, recorrendo a técnicas de processamento e análise de imagem, é pertinente pelo facto de, aquando do disparo, as armas de fogo imprimirem marcas únicas nos invólucros e projéteis deflagrados, permitindo relacionar evidências deflagradas pela mesma arma. A comparação manual de evidências encontradas numa cena de crime com evidências presentes numa base de dados, em termos de parâmetros visuais, constitui uma abordagem demorada. No âmbito deste trabalho pretendeu-se desenvolver técnicas automáticas de processamento e análise de imagens de evidências, obtidas através do microscópio ótico de comparação, tendo por base algoritmos computacionais. Estes foram desenvolvidos com recurso a pacotes de bibliotecas e a ferramentas *open-source*. Para a aquisição das imagens de evidências balísticas foram definidas quatro modalidades de aquisição: modalidade *Planar*, *Multifocus*, *Microscan* e *Multiscan*. Às imagens obtidas foram aplicados algoritmos de processamento especialmente desenvolvidos para o efeito. A aplicação dos algoritmos de processamento permite a segmentação de imagem, a extração de características e o alinhamento de imagem. Este último tem como finalidade correlacionar as evidências e obter um valor quantitativo (métrica), indicando o quão similares essas evidências são. Com base no trabalho desenvolvido e nos resultados obtidos, foram definidos protocolos de aquisição de imagens de microscopia, que possibilitam a aquisição de imagens das regiões passíveis de serem estudadas, assim como algoritmos que permitem automatizar o posterior processo de alinhamento de imagens de evidências, constituindo uma vantagem em relação ao processo de comparação manual.

Abstract

New technologies applied to image processing and pattern recognition have been experiencing a tremendous progress over the last decades. Its application intersects with several fields, namely forensic ballistics. The study of evidence (cartridge cases and bullets) found at a crime scene by using processing techniques and image analysis is relevant because, at the time of the shot, firearms print unique marks on fired cartridge cases and bullets, which enables to match evidence fired by the same weapon. In terms of visual parameters, the manual comparison of evidence found at a crime scene with evidence existing in a database is a time-consuming approach. In the framework of this work, the intention was to develop processing techniques and image analysis of evidence obtained by the optical comparison microscope, based on computational algorithms, which enabled automating the entire process. These were developed by using open-source software packages and free tools. In order to acquire images of ballistics evidence, four modes of acquisition were defined: Planar, Multifocus, Microscan and Multiscan. Processing algorithms were applied to the images obtained in each of the modes previously exposed. Other images were obtained only for the purpose of serving as documentation. Its application allows image segmentation, feature extraction and image alignment. The last aims to correlate the evidence and obtain a numerical value corresponding to metric that indicates how similar the evidence is. On the basis of the work developed and the results obtained, an optimized and tested protocol for image acquisition was created, allowing the acquisition of images of the regions liable to be studied, as well as algorithms that enable to automate the subsequent process of aligning images of evidence, thus providing an advantage over the manual comparison process.

Resumé

Les nouvelles technologies appliquées au traitement d'image et reconnaissance de patrons ont expérimenté un énorme progrès au cours des dernières décennies. Son application est transversale à plusieurs domaines, notamment dans le domaine de la balistique médico-légale. L'étude de preuves (douilles et projectiles) trouvées sur les lieux du crime, en utilisant des techniques de traitement et d'analyse d'image, est pertinente étant donné que, lors du coup de feu, les armes à feu impriment des marques uniques sur les douilles et les projectiles déclenchés, ce qui permet de faire correspondre les preuves tirées par la même arme. Sur le plan de paramètres visuels, la comparaison manuelle de preuves trouvées sur les lieux du crime avec des preuves présentes dans une base de données est une démarche de longue haleine. Dans le cadre de ce travail, l'intention a été de développer des techniques de traitement et d'analyse d'images de preuves, obtenues par le microscope optique de comparaison, basé sur des algorithmes de calcul, en permettant d'automatiser tout le processus. Ceux-ci ont été développés en utilisant des logiciels open-source et des outils gratuits. Quatre modalités d'acquisition ont été définies pour l'acquisition des images de preuves balistiques: les modalités Plane, Multifocus, Microscan et Multiscan. Des algorithmes de traitement ont été appliqués aux images obtenues. L'application des algorithmes permet la segmentation d'image, l'extraction de caractéristiques et l'alignement de l'image. Ce dernier vise à établir une corrélation entre les preuves et obtenir une valeur quantitative (métrique) qui indique le degré de similitude de ces preuves. Sur la base du travail développé et les résultats obtenus, un protocole d'acquisition d'image optimisé et testé a été créé, permettant l'acquisition d'images des régions susceptibles d'être étudiées, ainsi que des algorithmes qui permettent d'automatiser le processus postérieur d'alignement des images des preuves, fournissant ainsi un avantage sur le processus de comparaison manuelle.

Conteúdo

Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract	x
Resumé	xii
Conteúdo	xv
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxi
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objectivos e Motivação	2
1.3 Contribuições	2
1.4 Organização da Tese	3
2. Balística Forense	7
2.1 Medicina Legal e Ciências Forenses	7
2.2 Instituto Nacional de Medicina Legal e Ciências Forenses, I.P.	11
2.3 Imagiologia Forense	14
2.3.1 Balística Forense	14
2.3.2 Autópsia Virtual	15
2.3.3 Vídeo-vigilância	16
2.3.4 Pegadas e Marcas de Pneus	18
2.3.5 Impressões Digitais	19
2.3.6 Documentos Escritos	22
2.4 Balística	23
2.4.1 Bases de Dados	27

3. Evidências Balísticas	31
3.1 Armas de Fogo	31
3.1.1 Nomenclatura das Armas de Fogo	33
3.1.2 Mecanismos de Impressão de Marcas	35
3.2 Munições	36
3.3 Invólucros	36
3.3.1 Nomenclatura dos Invólucros	38
3.3.2 Marcas em Invólucros Deflagrados	42
3.4 Projéteis	43
3.4.1 Nomenclatura dos Projéteis	44
3.4.2 Marcas em Projéteis Deflagrados	46
3.5 Recolha de Evidências	47
3.6 Documentação e Medição de Evidências Balísticas	50
4. Aquisição de Imagem de Evidências Balísticas	53
4.1 Modalidades de Imagiologia	53
4.1.1 Tomografia Computorizada	53
4.1.2 Microscopia Eletrónica de Varrimento	54
4.1.3 Microscopia - Método Fotométrico	55
4.1.4 Varrimento LASER	56
4.2 Microscopia de Comparação	56
4.2.1 Microscópio Ótico	57
4.2.2 Software LAS	58
4.3 Parâmetros de Aquisição de Imagem	62
4.3.1 Ampliação	63
4.3.2 Iluminação	63
4.3.3 Modalidades de Aquisição de Imagem	65
4.4 Protocolos de Aquisição	67
4.4.1 Modalidades <i>Planar e Microscan</i>	68
4.4.2 Modalidades <i>Multifocus e Multiscan</i>	69
4.4.3 Comparação Manual	75
4.5 Gestão de Dados	75
5. Processamento e Visualização de Imagem	79
5.1 ITK - <i>Insight Toolkit</i>	79
5.1.1 Segmentação de Imagem	80
5.1.2 Alinhamento de Imagem	83
5.2 VTK - <i>Visualization Toolkit</i>	86
5.3 ITK SNAP	87
5.4 ParaView	89
5.5 MySQL Workbench	90
5.6 Python	93

6. Algoritmos Implementados - Invólucros	95
6.1 Segmentação Planar	97
6.1.1 Conversão de Formato	97
6.1.2 Conversão para Cinzento	98
6.1.3 Crescimento de Região	98
6.1.4 Análise de Components Conetados	99
6.2 Depthmap - Análise	100
6.2.1 Reconstrução de Superfície	103
6.2.2 Correção do Mapa de Profundidade	106
6.2.3 Transformada Polar	108
6.2.4 Extração de Região de Interesse	111
6.3 Alinhamento de Imagens	112
6.3.1 Método semi-automático de comparação	119
7. Conclusão	125
Bibliografia	128
Índice	134

Lista de Figuras

2.1	Organigrama do INMLCF, I.P.	13
2.2	Exemplos de sistemas de identificação balística	15
2.3	Autópsia Virtual	17
2.4	Sistema de vídeo-vigilância	18
2.5	Processamento em imagens de pegadas	19
2.6	Sistema Automático para Identificação de Impressões Digitais	21
2.7	Processamento de imagem em documentos escritos	22
2.8	Balística terminal	25
2.9	Equipamentos utilizados em balística forense	27
2.10	Sistema IBIS	28
3.1	Armas de fogo curtas	33
3.2	Componentes das armas de fogo	34
3.3	Mecanismos de impressão de marcas em invólucros e projéteis	37
3.4	Constituição de uma Munição	38
3.5	Forma dos invólucros	39
3.6	Diferentes tipos de rebordo de um invólucro	39
3.7	Tipos de percussão	41
3.8	Região da base do invólucro	41
3.9	<i>HeadStamps</i>	42
3.10	Regiões e principais marcas da região da base do invólucro	43
3.11	Modelo geométrico de um projétil	44
3.12	Projéteis com revestimento parcial metálico	45
3.13	Configurações básicas dos projéteis	46
3.14	Estrias presentes em projéteis	47
3.15	Armas de fogo curtas utilizadas em disparos de treino	48
3.16	Evidências resultantes dos disparos de treino	50
3.17	Evidências balísticas individualizadas e etiquetadas	51
3.18	Instrumentos utilizados para medições físicas	52
4.1	Tomografia Computorizada	54
4.2	Microscopia Eletrónica de Varrimento	55
4.3	Superfície topográfica obtida através do método fotométrico	56

4.4	Microscópio ótico de Comparação, <i>Leica Microsystems</i> , modelo FS-C	57
4.5	Separador Setup do <i>software LAS</i>	59
4.6	Separador Acquire do <i>software LAS</i>	60
4.7	Separador Process do <i>software LAS</i>	62
4.8	Iluminação LED	65
4.9	Separador <i>Browse</i> do <i>software LAS</i>	67
4.10	Separador <i>Acquire</i>	68
4.11	Suporte para invólucros e projéteis	69
4.12	Resultados da modalidade Planar	70
4.13	Suporte para projéteis	71
4.14	Resultados da modalidade Microscan	72
4.15	Evidências no suporte da plataforma para aquisição de imagem	73
4.16	Definição da amplitude de varrimento	73
4.17	Resultados da modalidade Multifocus	74
4.18	Microscopia de Comparação	76
5.1	Conceito geométrico associado à imagem digital.	80
5.2	Iterador de vizinhança.	81
5.3	Crescimento de região	82
5.4	Componentes básicos de um algoritmo de alinhamento	84
5.5	Alinhamento de imagem	85
5.6	Reconstrução tridimensional da superfície da região do primário	87
5.7	Janela de visualização e interação do VTK	88
5.8	ITK SNAP	89
5.9	Ecrã Principal - Paraview 3.14.0	90
5.10	Ecrã Principal - Workbench 5.2	91
5.11	Modelo relacional normalizado	92
5.12	Ecrã Principal - Python 2.7	93
6.1	Pipeline - Algoritmo de Segmentação Planar	96
6.2	Efeito local do filtro de mediana	98
6.3	Obtenção da região de interesse	99
6.4	Segmentação Planar: Gráfico de dispersão	102
6.5	Segmentação Planar: Diâmetro automático e manual	102
6.6	Pipeline - Análise Depthmap	104
6.7	Reconstrução tridimensional da superfície da região do primário	105
6.8	Correção da inclinação na imagem depthmap	107
6.9	Imagens do mapa de profundidade	107
6.10	Histograma da imagem Depthmap	108
6.11	Representação gráfica do mapeamento da transformada polar	109
6.12	Mapeamento da transformada polar	109
6.13	Profundidade média radial	110
6.14	Esquema representativo da extração de uma ROI	112
6.15	Extração da região de interesse	113
6.16	Alinhamento de imagem - <i>Normalized Correlation</i>	115

6.17 Gráfico de dispersão	116
6.18 Matriz com os resultados das métricas obtidos	117
6.19 Matriz com os resultados das métricas ordenadas	118
6.20 Matriz com os resultados das métricas ordenadas e binarizadas	120
6.21 Configurações da janela de exibição do <i>Rectilinear Wipe Widget</i>	121

Lista de Tabelas

2.1	Número de crimes registados por tipo de arma utilizada	24
3.1	Especificações das armas de fogo utilizadas nos disparos de treino . . .	49
3.2	Especificações das munições utilizadas nos disparos de treino	49
3.3	Relação entre armas de fogo e respetivas munições deflagradas	49
4.1	Imagens de Microscopia: níveis de ampliação	64
4.2	Estudos realizados para diferentes regiões de interesse	66
4.3	Ficheiros obtidos para cada estudo	77
6.1	Segmentação Planar: diâmetro equivalente	101

Introdução

1.1 Enquadramento

A criminalidade tem vindo a aumentar, em grande parte devido ao maior número de crimes cometidos por arma de fogo. Estes apresentam um impacto importante na sociedade, e como tal, é fundamental mobilizar todos os recursos disponíveis, no sentido de apurar o responsável ou os responsáveis pelo crime. Deste modo, as novas tecnologias tem-se revestido de especial importância no âmbito da balística forense, na medida em que as evidências (armas de fogo, munições, invólucros e projéteis) encontradas na cena de crime, podem ser utilizadas como provas importantes na resolução dos crimes. O seu estudo poderá indicar que arma foi responsável pelo(s) disparo(s), e conseqüentemente, apontar um determinado indivíduo como suspeito [1, 2]. Tal é possível, pelo fato das armas de fogo imprimirem marcas únicas nos projéteis e invólucros deflagrados, à semelhança das impressões digitais deixadas pelo(s) dedo(s) quando entra em contacto com uma determinada superfície. Estas marcas são, como tal, consideradas uma impressão digital da arma de fogo [3]. A análise e comparação destas, constitui uma papel importante na investigação de um crime, e tradicionalmente, a sua análise e comparação é realizada manualmente, por peritos com muitos anos de experiência, com recurso ao microscópio ótico de comparação. No entanto, esta abordagem revela-se muito demorada, e portanto, no início dos anos 90 começaram a ser desenvolvidos sistemas automáticos de comparação, para auxiliar os peritos no processamento de grandes volumes de evidências, tornando todo o processo mais eficiente [3, 4, 5]. Atualmente, o sistema IBIS (*Integrated Ballistics Identification System*) [6], desenvolvido pela *Forensic Technology Inc.*, constitui um dos mais avançados sistemas de identificação balística em bases de dados.

1.2 Objectivos e Motivação

As armas de fogo imprimem marcas microscópicas em invólucros e projéteis durante o processo de disparo. A possibilidade de relacionar invólucros e projéteis disparados pela mesma arma, constitui um desafio de particular relevância no domínio da criminalística [7]. A comparação manual de evidências encontradas numa cena de crime, com evidências presentes numa base de dados, em termos de parâmetros visuais, apesar de útil, constitui uma abordagem demorada, dependente da experiência do operador e com maior suscetibilidade de ocorrência de erros. Considerando estes aspetos, torna-se pertinente o desenvolvimento de um método automático de processamento e análise de imagens de evidências, adquiridas através do microscópio ótico de comparação, sendo este o principal objetivo da presente dissertação. A mobilização dos conhecimentos adquiridos na área do processamento de imagem, permitirão a sua concretização. Esta metodologia permite automatizar o processo, diminuindo, assim, a ocorrência de erros e o tempo despendido na análise e comparação manual, o qual constitui um fator determinante, no que ao desfecho de um caso de crime diz respeito.

A implementação dos referidos métodos e os resultados obtidos, deverão representar uma contribuição significativa na área da balística forense. Sendo esta uma área de investigação relativamente recente e sujeita a um grande progresso, onde ainda existe muito para ser explorado, torna-se bastante motivador o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à balística forense. Em Portugal, tanto quanto foi possível apurar, não existe nenhum trabalho de investigação nesta área, constituindo este, ao que se julga, o primeiro trabalho realizado dentro deste âmbito. Assim, a motivação desta tese resultou da necessidade em desenvolver, aplicar, ensaiar e analisar metodologias computacionais para segmentação, correção e alinhamento de evidências balísticas, e da indispensabilidade em obter técnicas robustas para alcançar alternativas à comparação manual, que é uma tarefa consumidora de muito tempo e dependente do operador.

1.3 Contribuições

As principais contribuições resultantes desta tese enquadram-se por um lado, num plano teórico, onde se insere o trabalho de análise e síntese realizado a partir do estudo da bibliografia relevante às temáticas abordadas, e por outro, num aspeto prático, onde se incluem as tarefas de âmbito experimental realizadas. Desta forma,

pode-se destacar que as contribuições alcançadas com este trabalho prendem-se essencialmente com:

- A realização de um trabalho original da área da balística forense em Portugal;
- O desenvolvimento de protocolos de aquisição de imagens de microscopia, tendo em consideração as particularidades de *hardware* e de *software* do microscópio ótico de comparação da marca *Leica Microsystems*, modelo FS-C. De forma a aumentar-se a qualidade das imagens adquiridas, foi aplicado ao microscópio um sistema de iluminação constituído por um anel de LED (*Light Emitting Diode*) desenvolvido especialmente para o efeito;
- O desenvolvimento de um algoritmo de segmentação planar que permite determinar de forma automática o calibre de uma munição, com base na determinação do diâmetro equivalente da região da base do invólucro. O diâmetro equivalente desta região é calculado a partir do valor da área do objeto segmentado, correspondente à região circular da base do invólucro;
- O desenvolvimento de um algoritmo que permite, de forma automática, a extração de uma região de interesse correspondente à região do primário do invólucro. Para a extração da referida região, foram definidos passos intermédios para a correção do plano de inclinação da superfície da evidência e deteção do círculo *primer pocket gap*;
- O desenvolvimento de um algoritmo de alinhamento automático de imagens de invólucros, que permite determinar um valor quantitativo (métrica) indicativo do quão similares eles são.

1.4 Organização da Tese

A presente dissertação encontra-se estruturada de modo a que os conceitos e resultados apresentados possam ser corretamente interpretados, tendo como base os fundamentos teóricos (estado da arte), nos quais esta tese se alicerça. Desta forma, o presente documento encontra-se dividido em vários capítulos, que abordam conceitos teóricos e resultados experimentais, resultantes da implementação de algoritmos de processamento de imagem:

Capítulo 2 - Balística Forense: É apresentada uma descrição da Medicina Legal e das Ciências Forenses, assim como as Instituições que em Portugal asseguram a prestação de serviços médico-legais. São também apresentadas as principais tecnologias de processamento de imagem aplicadas às Ciências Forenses, entre as quais, o Sistema IBIS, que constitui um dos mais avançados sistemas de identificação balística em bases de dados.

Capítulo 3 - Evidências Balísticas: São expostas as evidências consideradas, no âmbito da balística forense (armas de fogo, munições, invólucros e projéteis) assim como a nomenclatura que as caracteriza. De forma a estabelecer se existe ou não uma relação entre as armas de fogo e as munições por elas deflagradas, são apresentados os mecanismos de disparo das armas utilizadas na presente dissertação, e as marcas presentes em invólucros e projéteis, após serem deflagrados.

Capítulo 4 - Aquisição de Imagem de Evidências Balísticas: É feita uma descrição dos constituintes do microscópio ótico de comparação, utilizado na aquisição de imagens de evidências balísticas no âmbito da presente dissertação. Para além da descrição do *hardware*, são descritos os 5 separadores principais que compõem o *software* do microscópio, e também o protocolo de aquisição de imagem desenvolvido. Por fim, são apresentados alguns resultados da comparação manual de evidências, com recurso ao microscópio ótico de comparação.

Capítulo 5 - Processamento e Visualização de Imagem: São mencionadas as principais ferramentas computacionais utilizadas no processamento, visualização e gestão dos dados obtidos através dos algoritmos desenvolvidos. Este capítulo tem como principal objetivo preparar o leitor para o capítulo seguinte, e como tal, é apresentada alguma teoria acerca da segmentação e alinhamento de imagem.

Capítulo 6 - Algoritmos Implementados - Invólucros: São apresentados os algoritmos desenvolvidos para o processamento de imagem em invólucros. Da implementação destes algoritmos resulta informação de grande importância, que indica, entre outros, o calibre da munição e a probabilidade de duas evidências terem sido deflagradas pela mesma arma. Esta probabilidade resulta de valores obtidos a partir do algoritmo de alinhamento.

Capítulo 7 - Conclusão: Apresentam-se as conclusões finais sobre o trabalho desenvolvido e sobre os resultados obtidos. São discutidos aspectos relevantes do trabalho desenvolvido, e são apresentadas algumas sugestões para trabalho futuro.

Balística Forense

2.1 Medicina Legal e Ciências Forenses

A Medicina Legal é uma ciência que engloba um largo espectro de conhecimentos e possui extraordinária importância no conjunto dos interesses da sociedade, e exercita-se cada vez mais em razão das necessidades da ordem pública e do equilíbrio social [8]. Hoje, mais do que nunca, a Medicina Legal apresenta-se como uma contribuição da mais alta valia e de proveito irrecusável na boa administração da justiça. É uma disciplina de amplas possibilidades e de profunda dimensão pelo fato de não se resumir apenas ao estudo da ciência hipocrática, mas de se constituir da soma de todas as especialidades médicas acrescidas de outras ciências, destacando-se a ciência do Direito [9]. A Medicina Legal não se preocupa apenas com o indivíduo enquanto vivo. Alcança-o enquanto criança, e muitos anos depois, após a morte. É muito mais uma ciência social do que propriamente um capítulo da Medicina, devido à sua preocupação no estudo das mais diversas formas de conveniência humana e do bem comum. Constitui a contribuição médica e biológica às questões complementares do Direito e às questões de ordem pública aquando do interesse da administração da justiça. É, portanto a mais importante e significativa das ciências do Direito.

O registo criminal da violência projeta-se além da expectativa mais alarmista. Verifica-se nos dias que correm uma prevalência delinvente que extrapola os índices tolerados e padrões tradicionais. Trata-se de uma criminalidade diferente, anómala e muito estranha na sua maneira de agir e de insensata motivação. O direito moderno não pode deixar de aceitar a contribuição cada vez mais íntima da ciência, e o operador jurídico não deve desprezar o conhecimento dos técnicos, pois só assim é possível a aproximação à verdade que se pretende apurar. Hoje em dia, é

praticamente inconcebível fazer-se justiça sem a contribuição da Medicina Legal, consolidando-se a ideia de que a justiça não se limita ao conhecimento da lei, da doutrina e da jurisprudência [8].

Ao longo da história, atribuiu-se aos médicos o papel de prestar cuidados de saúde sem que se valorizassem certos aspectos fundamentais de natureza legal, sendo a recolha de vestígios de crimes, por exemplo, frequentemente negligenciada. Esta lacuna negava o direito à obtenção dos meios de prova, quando secundariamente surgiam questões legais de natureza criminal, civil ou do trabalho. Entretanto, ocorreram grandes mudanças na sociedade, e hoje em dia, a Medicina Legal e restantes ciências forenses são mais abrangentes, nomeadamente no que se refere ao seu papel social [10, 11]. Entre estas mudanças, destaca-se o aumento do número de crimes, o desenvolvimento da ciência médica quer a nível de cuidados de saúde, quer a nível tecnológico, o posicionamento do direito e da lei face à tomada de consciência sobre os direitos humanos e o alargamento dos cuidados de saúde a toda a população [10]. Estes e outros fatores têm levado a que profissionais de saúde, sejam cada vez mais, chamados a examinar e a pronunciar-se sobre situações variadas relacionadas com questões legais. Esta complexidade e variedade de temas levou à necessidade de tornar a Medicina Legal uma especialidade capaz de formar e habilitar profissionais para o cumprimento de tarefas que exigem um grande rigor científico, permanente atualização e capacidade de isenção e imparcialidade, de forma a não colocar em risco o interesse público, os direitos individuais e, portanto, a justiça [11]. Desta forma, considera-se que compete à Medicina Legal, não só o diagnóstico do caso, mas também a contribuição através da perícia, para a terapêutica das situações e, sobretudo para a prevenção e reabilitação/reinserção [10]. De uma forma genérica, a Medicina Legal pode ser subdividida nas seguintes áreas:

1. Medicina forense

- Patologia forense;
- Clínica forense;
- Psiquiatria e Psicologia forense;

2. Ciências Forenses

- Toxicologia forense;
- Genética e biologia forense;
- Anatomia-patológica forense;

- Criminalística;
- Antropologia forense;
- Odontologia forense;
- Entomologia forense;
- Botânica forense;
- Geologia forense.

Relativamente à Medicina Forense, esta é caracterizada por uma forte ligação à Medicina e suas especialidades, enquanto que as Ciências Forenses, como a Criminalística, onde se insere a balística, é definida como uma área onde a ciência é aplicada na resolução de disputas legais [12, 13]. Neste contexto, a ciência constitui grande importância e apresenta potencial para fornecer informação confiável, pertinente e definitiva sobre um determinado caso. A ciência permite ainda identificar indivíduos, objetos e substâncias, assim como estabelecer relação entre um indivíduo e uma determinada evidência encontrado numa cena de crime [14]. Assim, o objetivo das Ciências Forenses é permitir ao sistema judicial classificar um determinado caso de forma imparcial, de acordo com informação científica rigorosa. A informação pode ser crucial para determinar se um crime foi cometido, e em caso afirmativo, por quem, quando e como. Para tal, são definidas 3 fases distintas, presentes no processo de investigação, que vão desde a identificação e recolha da evidência no local do crime até à sua apresentação em tribunal sob a forma de um relatório pericial.

O envolvimento das Ciências Forenses na resolução de um crime, inicia-se sempre na cena de crime. Por conseguinte, a identificação e recolha eficaz de evidências é crucial para o sucesso da investigação subsequente. Assim que recolhidas, por separação e seguindo os procedimentos consagrados por *Guidelines* internacionalmente aceites, as evidências deverão ser empacotadas, etiquetadas e transportadas de forma apropriada para o laboratório, onde serão examinadas. A segurança das evidências é extremamente importante, desde o momento da recolha até à sua apreciação em tribunal [12]. Se a *continuidade da evidência*, ou *Cadeia de Custódia* (documento com o registo da progressão da evidência desde o momento da sua recolha) não for provada, então a evidência pode ser anulada em tribunal, dada a possibilidade de contaminação ou adulteração. De forma a minimizar o risco de contaminação devem ser tomadas algumas precauções:

1. Abertura do pacote que contém a evidência numa área diferente de onde ele foi selado;
2. Minimização do número de pessoas a manusear a evidência;
3. Armazenamento do pacote numa área dedicada e segura.

Depois de serem recolhidas no local do crime, as evidências são submetidas para o laboratório forense, onde serão examinadas. Em Portugal, tal como noutros países, os serviços que podem preceder à análise de uma evidência forense podem ser obtidos em várias organizações, incluindo departamentos policiais (por exemplo, o Laboratório de Polícia Científica da Polícia Judiciária - LPC), serviços de Ciências Forenses do Instituto Nacional de Medicina Legal e Ciências Forenses, I.P. (INMLCF, I.P.) e organizações independentes (por exemplo, Faculdades de Engenharia, de Farmácia e de Ciências). A análise forense destas evidências deverá apresentar resposta a um número importante de questões. Em primeiro lugar é necessário estabelecer uma data na qual o crime possa ter ocorrido. Depois, a preocupação recai em estabelecer uma ligação entre o suspeito, a vítima e a cena do crime. Isto significa que, qualquer contacto físico entre indivíduos, ou entre um indivíduo e o local ou objeto, pode resultar na transferência de vestígios de evidências físicas. Exemplos de vestígios incluem pelos e cabelos, fibras, tintas, fragmentos de vidro, fluidos corporais (como por exemplo, sangue, sémen, saliva e urina) e resíduos de disparos de armas. A comparação entre evidências similares recolhidas em diferentes locais, pode indicar se existe ligação entre eles, e ajudar a estabelecer relação entre o suspeito e a cena de crime.

Após uma análise minuciosa das evidências, cabe ao perito forense responsável pela investigação criminal, elaborar um relatório com todos os resultados obtidos, para ser apresentado em tribunal. O conteúdo do relatório deverá ser facilmente compreendido por todos os intervenientes, pertencentes ao sistema de justiça criminal [12]. Por vezes, é necessária a presença do perito em tribunal para dar o testemunho, e prestar todos os esclarecimentos que o tribunal entenda solicitar, com base nos factos, sempre que for necessário.

Em Portugal, os serviços médico-legais e forenses são assegurados pelo INMLCF, I.P.. Desde o ano 2001, Portugal dispõe de um Instituto Nacional de Medicina Legal, constituído por 3 delegações e cerca de 31 gabinetes médico-legais. As delegações situam-se no Porto (Delegação Norte), Coimbra (Delegação Centro) e Lisboa (Delegação Sul), enquanto que os gabinetes se encontram dispersos pelo país, assegurando

em conjunto, a cobertura do território nacional em termos de perícias médico-legais [15]. O LPC, por sua vez, funciona no âmbito da Polícia Judiciária (PJ) e surgiu em 1957, transitando para ele algumas áreas periciais que até então funcionavam no Instituto Nacional de Medicina Legal. Este laboratório tem como objetivo o desenvolvimento de atividade no âmbito da investigação criminal, mais propriamente na:

- Pesquisa, recolha, tratamento, registo de vestígios e realização de perícias nos diversos domínios das ciências forenses, nomeadamente na balística, biologia, em documentos, física, lofoscopia, química e toxicologia;
- Implementação de novos tipos de perícia;
- Divulgação de informação técnico-científica que se revele pertinente perante novos cenários de criminalidade;
- Emissão de pareceres e prestação assessoria técnico-científica no domínio das suas competências em ciências forenses;
- Implementação de um sistema de gestão para a qualidade e para as atividades administrativas e técnicas;
- Afirmação da participação técnica e científica da PJ, em matéria de ciências forenses, nas diferentes instâncias nacionais, comunitárias e internacionais¹.

2.2 Instituto Nacional de Medicina Legal e Ciências Forenses, I.P.

O Instituto Nacional de Medicina Legal e Ciências Forenses, Instituto Público, abreviadamente designado por INMLCF, I.P., é um instituto público integrado na administração indireta do Estado, que segue as atribuições do Ministério da Justiça, sob direção do membro do governo responsável pela área da justiça [16]. Com sede em Coimbra, dispõe de serviços descentralizados, denominados delegações, no Porto, Coimbra e Lisboa, na dependência dos quais funcionam os gabinetes médico-legais. No âmbito da sua missão e objetivos, o INMLCF, I.P., tem a natureza de laboratório do Estado e é considerado uma instituição nacional de referência na área científica

¹ <http://www.policiajudiciaria.pt/>

da Medicina Legal e das Ciências Forenses². Desenvolve a sua missão pericial em articulação com as autoridades judiciárias e judiciais, no âmbito da administração da justiça, na observância das normas e dos princípios legais e éticos que asseguram o respeito pelos direitos, liberdade e garantias dos cidadãos. A sua missão passa também pela promoção da formação e da investigação no domínio médico-legal.

Assim, são atribuições do INMLCF, I.P.:

- Apoiar a definição da política nacional na área da medicina legal e ciências forenses;
- Cooperar com os tribunais e restantes serviços que intervêm no sistema de administração da justiça, realizando exames e perícias médico-legais e forenses que lhe forem solicitados;
- Desenvolver atividades de investigação e divulgação científicas, no âmbito da medicina legal e ciências forenses, e desenvolver formas de colaboração científica e pedagógica com outras instituições;
- Dirigir a organização e a gestão dos seus serviços periciais forenses no território nacional;
- Adotar programas de garantia de qualidade aplicados aos exames e às perícias médico legais e forenses da sua competência e promover a harmonização das suas metodologias, técnicas e relatórios periciais, nomeadamente emitindo diretivas técnico-científicas sobre a matéria.

No que respeita à sua organização (Figura 2.1), o INMLCF, I.P. é constituído pelo conselho diretivo, conselho médico-legal e fiscal único. O conselho diretivo é composto por um presidente e três vogais, sendo que estes, exercem por inerência as funções de diretores das delegações, e são designados, preferencialmente, por professores universitários de medicina legal ou diretores de serviços médicos, com perfil, formação e experiência adequada ao exercício das respetivas funções [16]. Compete ao conselho diretivo definir as diretrizes de orientação da organização e funcionamento do INMLCF, I.P. com vista à realização dos seus objetivos, assim como supervisionar a atividade das delegações e dos gabinetes, bem como dos peritos contratados. O conselho diretivo está ainda incumbido de celebrar protocolos de cooperação com instituições de saúde, visando a utilização de recursos humanos ou

² <http://www.inml.mj.pt/>

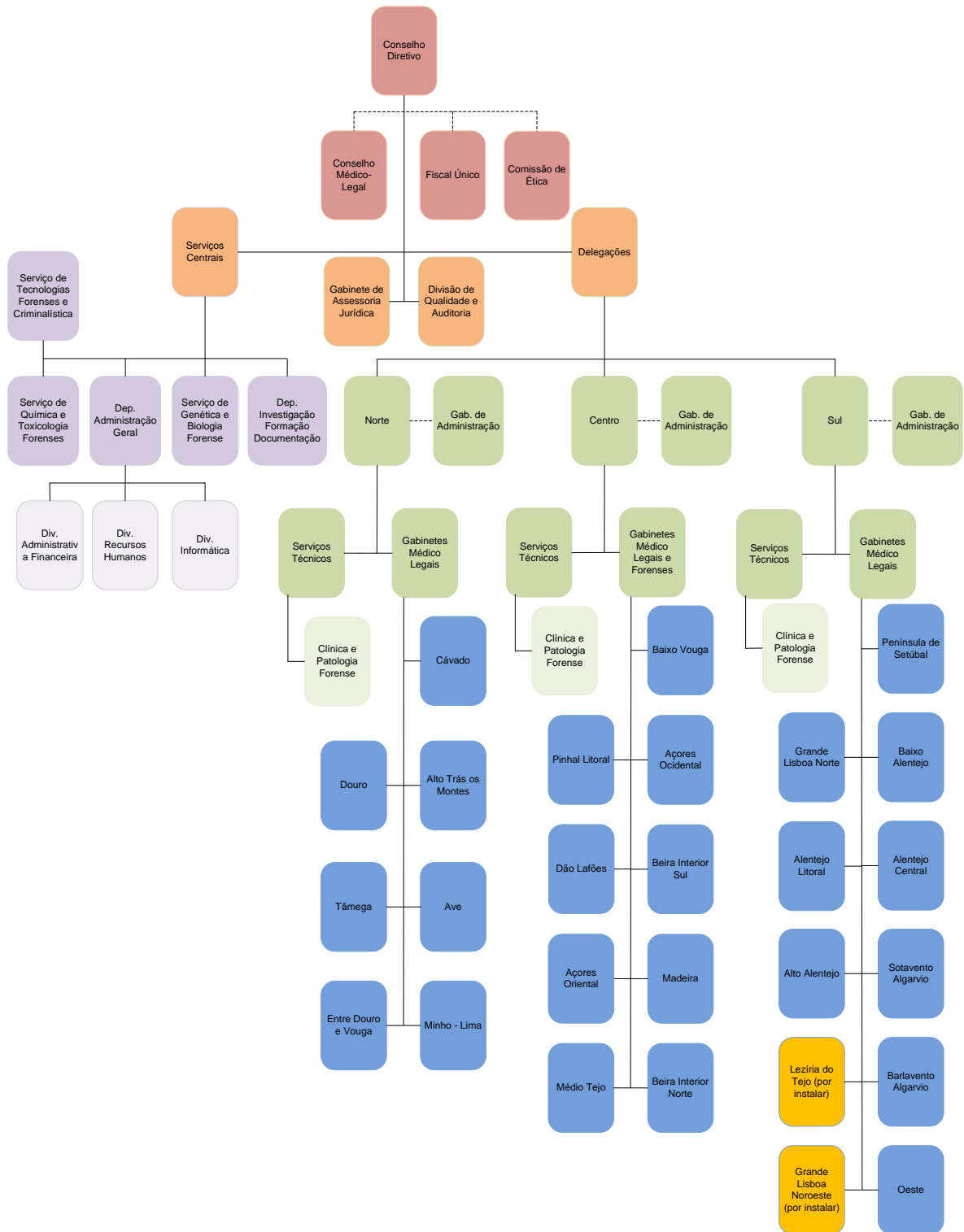


Fig. 2.1: Organograma do INMLCF, I.P.

materiais que garantam qualidade e segurança dos exames e perícias, e ainda conceder apoio financeiro a projetos de investigação nos diversos domínios da medicina legal e ciências forenses.

O conselho médico-legal, por sua vez, é composto pelo presidente do conselho diretivo, pelos diretores das delegações norte, centro e sul, por um representante dos conselhos regionais da ordem dos médicos, dois docentes do ensino superior de cada uma das áreas científicas de Clínica Cirúrgica, Clínica Médica, Obstetrícia e Ginecologia e Direito, e por um docente do ensino superior de cada uma das áreas científicas de Anatomia Patológica, Ética e ou Direito Médico, Ortopedia e Traumatologia, Neurologia ou Neurocirurgia e Psiquiatria [16]. O conselho médico-legal tem como principais competências emitir pareceres sobre questões técnico-científicas de natureza pericial e de fazer o seu acompanhamento e avaliação, propondo medidas adequadas ao cumprimento das suas tarefas.

Por fim, a comissão de ética emite pareceres sobre questões éticas, enquanto que o fiscal único é responsável pelo controlo da legalidade, da regularidade e da boa gestão financeira e patrimonial do INMLCF, I.P.. Este órgão tem como principais competências acompanhar e controlar o cumprimento das leis e regulamentos aplicáveis, a execução orçamental, situação económica, financeira e patrimonial.

2.3 Imagiologia Forense

O desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas ao processamento de imagem e reconhecimento de padrões tem influenciado a área das ciências forenses, e espera-se que no futuro o seu impacto seja ainda maior [11, 14, 17]. Hoje em dia, no âmbito forense, estas tecnologias são aplicadas em balística forense, autópsias virtuais, reconhecimento de pessoas em imagens de vídeo vigilância, identificação de pegadas, marcas de pneus e de impressões digitais, e ainda no reconhecimento da autenticidade de assinaturas, entre muitas outras aplicações.

2.3.1 Balística Forense

Nos últimos 30 anos, tem-se verificado grandes avanços no que diz respeito à computação aplicada à aquisição de imagens de evidências balísticas. No início dos anos 90, o *Federal Bureau of Investigation* (FBI) desenvolveu um sistema, conhecido como *Drugfire*, para aquisição de imagens de projéteis e invólucros. Após a aquisição, as imagens eram analisadas e comparadas manualmente com outras, no sentido

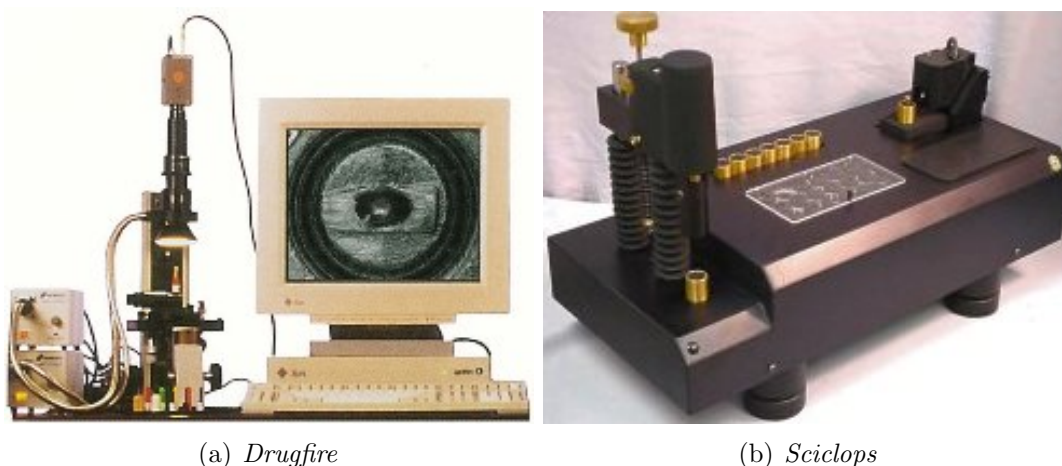


Fig. 2.2: Exemplos de sistemas de identificação balística [18].

de encontrar similaridade entre ambas [1, 18, 19]. De forma a automatizar todo o processo e diminuir o tempo despendido na fase comparação, em Agosto de 1997, a empresa *Intelligent Automation Inc*³. (*IAI*), com o apoio do *National Institute of Justice*⁴ (*NIJ*) e *National Science Foundation*⁵ (*NSF*) desenvolveu um sistema de identificação balística 3D, o *SCICLOPS*[®][20]. Este representa o primeiro sistema de análise balística totalmente automatizado, que foi capaz de adquirir, processar e comparar invólucros e projéteis, de forma automática.

Mais recentemente, técnicas de processamento de imagem têm vindo a ser aplicadas ao estudo de superfícies de evidências. Estas técnicas são utilizadas, por exemplo, para extrair regiões de interesse de uma imagem, e essas regiões podem incluir pontos, linhas, contornos ou regiões [1]. Estes progressos revelam-se muito úteis na identificação de características que não são perceptíveis em imagens sem processamento, ajudando desta forma os peritos na identificação de marcas microscópicas deixadas por uma arma na superfície das evidências.

2.3.2 Autópsia Virtual

No ano de 2000, o Instituto de Medicina Forense e de Diagnóstico Radiológico, da Universidade de Bern, na Suíça, iniciou o projeto *Virtopsy* (Autópsia Virtual), com o propósito de desenvolver um método de imagem, não invasivo, que permitisse prever resultados da autópsia e ainda fornecer informação adicional [21, 22]. Para

³ <http://www.i-a-i.com/>

⁴ <http://www.nij.gov/>

⁵ <http://www.nsf.gov/>

tal, na aquisição de imagem, a autópsia virtual utiliza as modalidades de Tomografia Computorizada e Ressonância Magnética, pelo facto de possuírem grande contraste e resolução. Uma das principais aplicações da autópsia virtual é no estudo de lesões por projétil em vítimas de disparo por arma de fogo, a qual permite a visualização do padrão de fratura óssea, o trajeto do projétil e a sua localização 3D, a constatação da presença de ar na cavidade pleural (pneumotórax) e a aspiração de sangue para os pulmões [21, 22]. A Figura 2.3 apresenta algumas destas lesões, causadas por ferimentos de projétil. Neste sentido, a autópsia virtual apresenta algumas vantagens relativamente à autópsia convencional, entre as quais:

- Método não invasivo, impedindo a destruição de informação importante para a investigação forense;
- Dissecção virtual em vários planos, e a possibilidade de separação de diferentes tecidos;
- Exame de cadáveres contaminados por infeções, substâncias tóxicas e radio-nuclídeos, sem qualquer risco associado;
- O pós-processamento 2D e 3D das imagens permitem a visualização de achados importantes para fornecer ao tribunal;
- Método alternativo à autópsia convencional em culturas, onde a autópsia não é tolerada pela religião;
- A possibilidade de transmissão de imagens para apreciação de peritos de outras instituições.

No futuro, espera-se que o rápido desenvolvimento de métodos radiológicos conduzam a novos horizontes, na documentação e exames forenses de indivíduos, vivos e mortos.

2.3.3 Vídeovigilância

No que respeita ao reconhecimento facial, as imagens de vídeovigilância utilizadas na identificação de pessoas, normalmente apresentam fraca qualidade, causada por más condições de iluminação, resolução da câmara e pelo desgaste do equipamento [17, 23]. Como tal, são necessários filtros de restauração de imagem como o *Wiener filter* [24], *Maximum Entropy* [25] e PDEs (*Partial Differential Equations*) [26], que permitem melhorar significativamente a qualidade de uma imagem, tornando-a prova

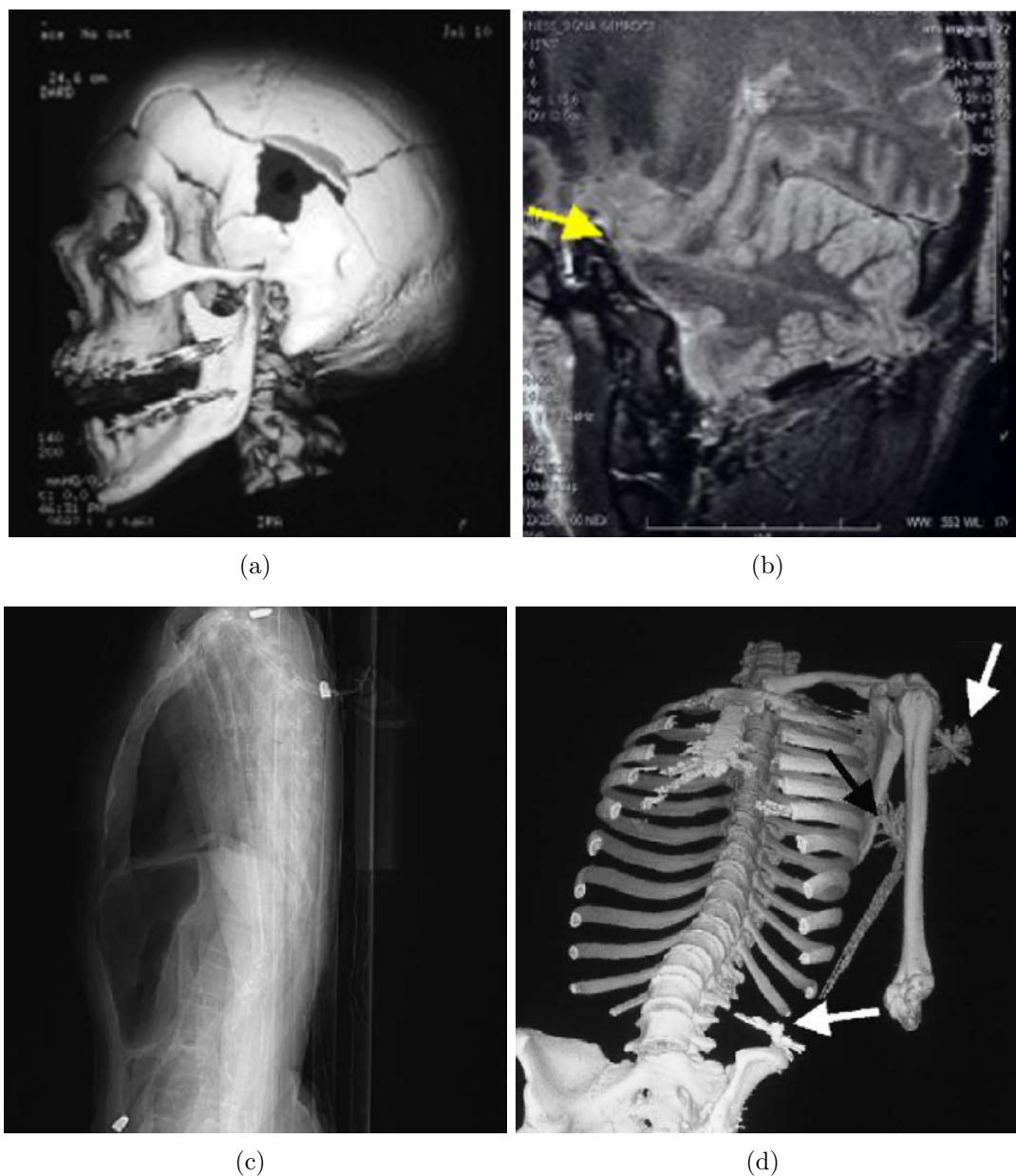


Fig. 2.3: Imagens de Tomografia Computorizada e Ressonância Magnética utilizadas para autópsia virtual: (a) Reconstrução 3D - Tomografia Computorizada Multi-Corte Helicoidal de uma lesão causada por projétil [21]. O orifício de saída é visível através do orifício de entrada; (b) Lesão causada por projétil no crânio. A Ressonância Magnética permite visualizar o trajeto do projétil no cérebro [21]; (c) Tomografia Computorizada a vítima de tiroteio. A projeção lateral permite a visualização de 3 projéteis no corpo [22]; (d) Tomografia Computorizada a vítima de tiroteio. A reconstrução 3D da superfície óssea mostra a localização dos 3 projéteis [22].



Fig. 2.4: Sistema de vídeo-vigilância utilizado para extração de características do corpo humano [17].

válida para ser utilizada em tribunal. Para uma sequência de imagens, o conteúdo de cada uma delas pode ser combinado numa imagem final, tornando-a mais nítida e com melhor resolução [17].

Para além dos referidos filtros de processamento de imagem, existem softwares que permitem extrair características de indivíduos a partir de imagens obtidas através de câmaras de vídeo-vigilância. Na Figura 2.4 é apresentado um exemplo de um sistema de vídeo-vigilância utilizado para determinar características 3D do corpo humano, com recurso ao software *StudioMax*. Este software permite realizar medições de altura aproximada do corpo do suspeito, com base em pontos de referência presentes na imagem. Para uma correta medição, devem ser tidos em conta, a altura da sola do sapato e uma possível curvatura do corpo [17]. Apesar das imagens tridimensionais serem bastante apelativas, estas deverão sempre passar por um processo de validação antes de serem usadas como prova em tribunal, caso contrário, pode não ser aceite. O processo de validação passa pela extração de características de um indivíduo, para o qual sejam conhecidos todos os seus atributos físicos.

2.3.4 Pegadas e Marcas de Pneus

As novas tecnologias de imagiologia forense são também aplicadas na identificação de possíveis pegadas e marcas de pneus, presentes numa cena de crime. O processo de identificação destes dois achados é efetuado da mesma forma, e pode constituir prova em tribunal. Segundo Geradts [17], as marcas de pegadas são encontradas na maior parte das vezes no local do crime. Uma vez encontradas, elas são recuperadas com recurso a gelatina e levantadores eletrostáticos de poeira que são depositados

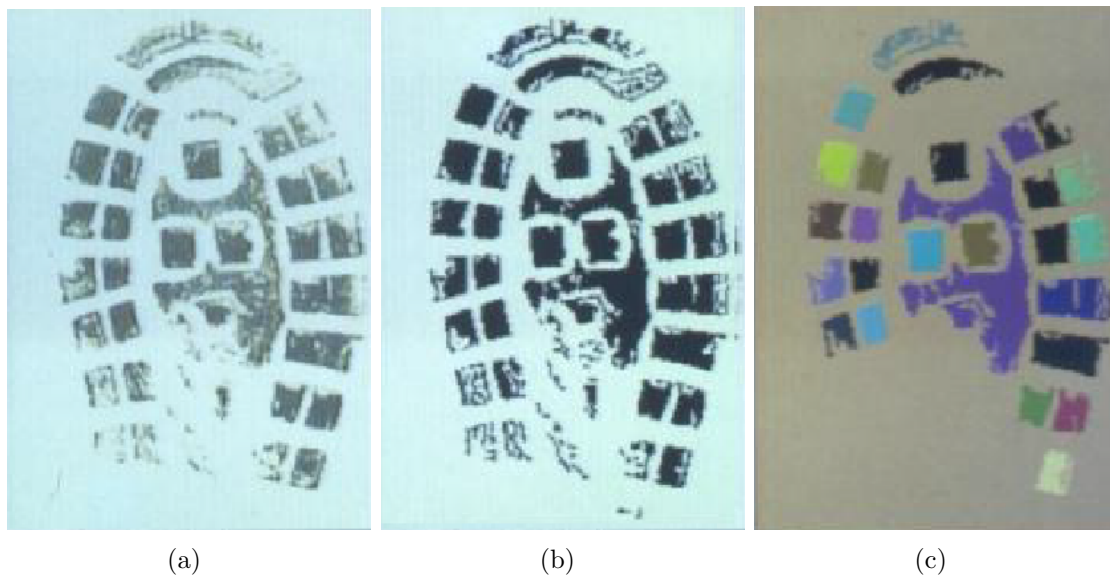


Fig. 2.5: Processamento em imagens de pegadas: (a) Imagem original; (b) Imagem segmentada; (c) Imagem etiquetada [23].

sobre si [27]. Após a recuperação da pegada, esta é digitalizada, e de seguida ocorre a extração de características com recurso a algoritmos de processamento de imagem (Figura 2.5). Por fim, essas características são classificadas de acordo com o seu tamanho e forma (normalmente circular ou triangular) [27]. A alternativa para o reconhecimento da forma da pegada é normalmente tomada por um sistema de redes neuronais. Após o processamento, as imagens são submetidas para uma base de dados, onde um algoritmo de correspondência tomará a decisão de autenticação, de acordo com a similaridade existente entre a evidência submetida e as existentes na base de dados. Dado o tempo excessivo que o ser humano consome no processo de classificação, e o facto do critério de classificação poder ser variável de uns casos para outros, este processo deverá ser automático [17].

2.3.5 Impressões Digitais

Para além de pegadas e marcas de pneus, as impressões digitais são elementos que também são procurados e encontrados em cenas de crime. Estas assumem-se como assinaturas biométricas, e têm sido, desde sempre, amplamente utilizadas no reconhecimento de pessoas na área das ciências forenses, devido à sua singularidade e permanência no tempo [28]. Para o estudo destas assinaturas são utilizados sistemas biométricos, como por exemplo o AFIS (*Automated Fingerprint Identification System*) [29], que nasceu na década de 60, com o crescimento das grandes cidades dos

EUA, e a necessidade de identificar os seus cidadãos. Este sistema define 4 etapas essenciais para a identificação de um indivíduo:

1. Digitalização da impressão digital;
2. Processamento da imagem;
3. Extração de características (minúcias ou singularidades);
4. Comparação de minúcias;

Para a digitalização de uma impressão digital, existem dois métodos de aquisição de imagem [29]. Um é conhecido como método *off-line* e o outro *livescan* (digitalização em tempo real). No método *off-line*, a impressão é inicialmente recolhida através da aplicação de uma fina camada de tinta na extremidade do dedo, pressionando-o contra um cartão. Logo de seguida, a impressão contida na folha de papel é digitalizada com recurso a um *scanner* comum ou a uma máquina fotográfica. No método de digitalização em tempo real, são utilizados sensores, que fazem a leitura da impressão digital diretamente da extremidade do dedo, sem a necessidade de intermediário, constituindo uma vantagem em relação ao método *off-line*. Existem vários sensores de digitalização em tempo real (óticos, capacitivos, térmicos, por ultra-som e de pressão) que são utilizados para detetar os relevos presentes na extremidade do dedo [29]. Na Figura 2.6(a) é apresentada a imagem resultante do processo de aquisição/digitalização de imagem. Após a digitalização da imagem, é necessária a utilização de algoritmos de aperfeiçoamento, de forma a produzir uma imagem limpa, sem a existência de relevos gerados artificialmente durante a etapa anterior. Estes artefactos são produzidos devido a sujidade existente na extremidade do dedo ou então devido ao contacto inconsistente e derrapagem entre o dedo e a superfície do sensor. A eliminação destes artefactos constitui uma etapa essencial no processo de identificação, uma vez que evita a deteção de falsas minúcias numa fase posterior. Por vezes, é também utilizado um algoritmo de binarização, que é aplicado à imagem em tons de cinzento produzida na etapa de aperfeiçoamento de imagem, no sentido de aumentar o contraste entre as cristas (pixeis pretos) e os vales (pixeis brancos) [29]. A imagem resultante deste algoritmo é designada imagem esqueleto (Figura 2.6(b)), e a deteção de minúcias será aplicada em si, no sentido de localizar as coordenadas (x,y) , assim como a orientação (θ) dos pontos de minúcia. As minúcias, ou singularidades de uma impressão digital, são tradicionalmente utilizadas por especialistas forenses, e constituem parâmetros discriminantes em imagens

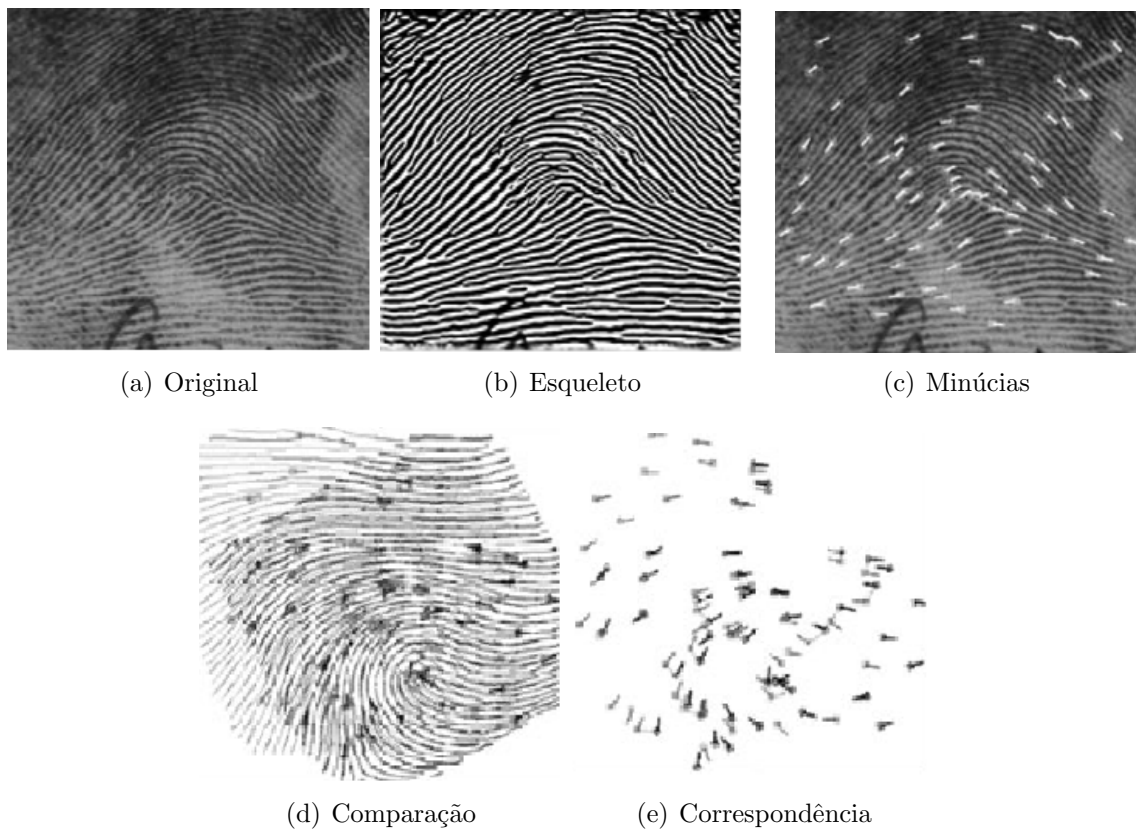


Fig. 2.6: Sistema Automático para Identificação de Impressões Digitais: (a) imagem resultante da digitalização da extremidade do dedo; (b) imagem esqueleto resultante de um algoritmo de binarização. Esta imagem permite evidenciar o contraste entre as cristas e os vales; (c) Minúcias detetadas a partir de relevos terminais e bifurcações de relevos; (d) Sobreposição de duas imagens com minúcias; (e) correspondência entre duas imagens com minúcias [29].

de impressões digitais. As singularidades mais comuns, são conhecidas como relevos terminais e bifurcações de relevos. Depois de obtidos os pontos de minúcia (Figura 2.6(c)), segue-se a etapa de comparação (Figura 2.6(d)), que tem como objetivo determinar a similaridade entre duas imagens de impressões digitais. A similaridade de duas imagens é determinada com base no número de minúcias encontradas, na sua proximidade, e na qualidade das imagens. Com base nestes parâmetros é estabelecida a correspondência (Figura 2.6(e)) [29]. Os resultados da comparação são classificados de acordo com o grau de semelhança, e combinados com outros critérios, no sentido de filtrar ainda mais os candidatos. Todo este processo pode ser automatizado e, conseqüentemente ocorrer sem intervenção humana.

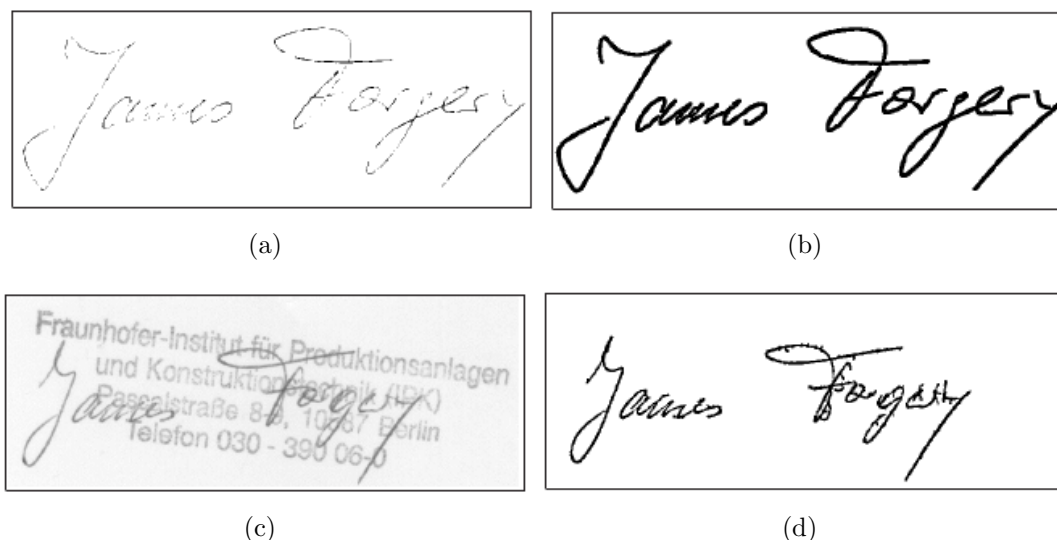


Fig. 2.7: Processamento de imagem em documentos escritos: (a) Assinatura com má qualidade; (b) Imagem binária da assinatura com boa qualidade; (c) Assinatura com carimbo sobreposto; (d) Assinatura após remoção do carimbo [30].

2.3.6 Documentos Escritos

Uma outra aplicação das tecnologias imagiológicas nas ciências forenses é a análise de caligrafia. A análise ou identificação de documentos escritos é frequentemente utilizada na investigação de crimes, nomeadamente, fraude financeira, extorsão, terrorismo e racismo [30]. Existem vários sistemas de análise de caligrafia no mercado, no entanto, destacam-se o *Fish-system*, desenvolvido pela polícia federal criminal da Alemanha, e o *Script*, desenvolvido na Holanda [30, 31, 32]. Em ambos os sistemas, a caligrafia é digitalizada, com recurso a um *scanner*, e os traços de determinadas letras são analisados pelo utilizador [23]. Após uma análise visual da imagem digitalizada, segue-se o processamento propriamente dito. Nesta etapa, ocorre a eliminação de ruído, remoção do fundo do documento (selos ou outras impressões) assim como outras marcas que não pertençam à evidência escrita, e ainda reconstrução de linhas de uma determinada letra (Figura 2.7)[30]. Para cada palavra, é medida a altura, inclinação e largura de cada uma das letras que a compõem [23]. Estes sistemas são normalmente utilizados para determinar o autor de um determinado documento textual.

2.4 Balística

Hoje em dia, os EUA são o país no mundo com o número mais alto e a maior e taxa de mortes por arma de fogo [12, 33]. Este fator pode ser justificado pelo facto de existirem aproximadamente 45% de domicílios com pelo menos uma arma de fogo. As mortes por arma de fogo estão entre as dez principais causas de morte, e tendem a tornar-se a principal causa de mortalidade nos próximos anos [33]. No entanto, enquanto que o aumento da taxa de homicídios por arma de fogo gera comentários na imprensa e grande preocupação nos organismos judiciais, o mesmo não se passa em relação aos casos de suicídios [33]. O suicídio com recurso a arma de fogo pode ocorrer como caso isolado, ou então, seguindo-se a um homicídio de uma ou várias vítimas. Esta relação homicídio-suicídio, refere-se ao incidente no qual o criminoso se suicida, após ter cometido um homicídio. Segundo Liem [34], este tipo de incidentes ocorre em mais de metade dos casos, no que respeita ao contexto de morte do conjuge.

Em Portugal, o número de crimes registados cometidos por arma de fogo tem vindo a diminuir desde o ano de 2008, ano em que se verificou o maior número de crimes cometidos por este tipo de arma (aproximadamente 20%), como se pode verificar na Tabela⁶ 2.1. Segundo dados da Polícia de Segurança Pública (PSP), existem registadas em Portugal 1.400.000 armas de fogo na posse de civis. O número de pedidos de novas licenças tem decrescido, justificando-se esta diminuição com a atual crise vivida no país. Apesar do decréscimo do número de crimes cometidos por arma de fogo, este tipo de crime constitui ainda grande parte do número de crimes cometidos anualmente em Portugal, e neste contexto, surge a necessidade de recorrer à balística, que tem como objetivo esclarecer e provar a ocorrência deste tipo de infrações penais. A área técnico-científica da balística constitui uma disciplina da criminalística que estuda as armas de fogo, as munições e os danos por elas causados, numa perspetiva relacionada com infrações penais, dividindo-se em 3 campos específicos:

- Balística interna;
- Balística externa;
- Balística terminal.

A balística interna estuda a estrutura, o mecanismo e o funcionamento da arma de fogo, assim como a transformação da energia química propulsora, em energia

⁶ <http://www.dgpj.mj.pt/>

Tab. 2.1: Número de crimes registados (fonte: <http://www.dgpj.mj.pt/>).

Ano	2012	2010	2008	2006	2004
Arma de fogo	1.937	2.224	3.330	2.417	2.546
Arma branca	1.993	2.653	3.592	4.429	3.753
Instrumento de trabalho	15	23	48	50	63
Outros instrumentos	839	1.006	267	285	367
Veneno	41	12	158	72	82
Força física	8.775	8.655	6.123	6.109	5.810
Coação psicológica	919	1.221	1.828	2.172	2.742
Outra arma ou Instrumento	4.079	4.812	316	389	—
Ignorada	766	842	703	460	405
Total	19.364	21.448	16.365	16.383	15.768

cinética obtida pelo projétil, a eficiência dessa transformação, e principalmente, as marcas adquiridas pelo invólucro e projétil, resultantes do contacto com percutor, culatra, extrator, ejetor e com cano da arma, respetivamente [12, 35]. Estas marcas apresentam grande importância na identificação da arma responsável pela ocorrência de um determinado disparo. A balística interna constitui o principal objeto de estudo desta dissertação, pelo que será abordado posteriormente de forma mais pormenorizada.

O comportamento do projétil desde o momento em que este abandona o cano da arma, até instantes antes do impacto com o alvo, é do domínio da balística externa [12, 36]. A balística externa analisa as condições de movimento, velocidade inicial, forma, massa, trajetória, resistência ao ar e ação da gravidade no projétil, e assume um papel fulcral no que respeita à reconstrução de uma cena de crime [12, 35]. A análise cuidada de todos estes parâmetros poderá ajudar a determinar a localização de um criminoso no momento dos disparos.

A balística terminal, por sua vez, estuda os efeitos produzidos pelo projétil, quando este atinge o alvo. Quando um projétil atinge um corpo com energia suficiente, este vai originar um orifício de entrada (Figura 2.8 (a)), e caso a energia cinética do projétil não se dissipe no interior do corpo, irá produzir um orifício de saída [12, 36, 37]. Caso contrário, o projétil irá ficar alojado no interior do corpo, como se pode visualizar na Figura 2.8 (b e c) [38, 39, 40]. *Orifício de entrada* é uma designação utilizada para referenciar o ponto de entrada de um projétil no corpo

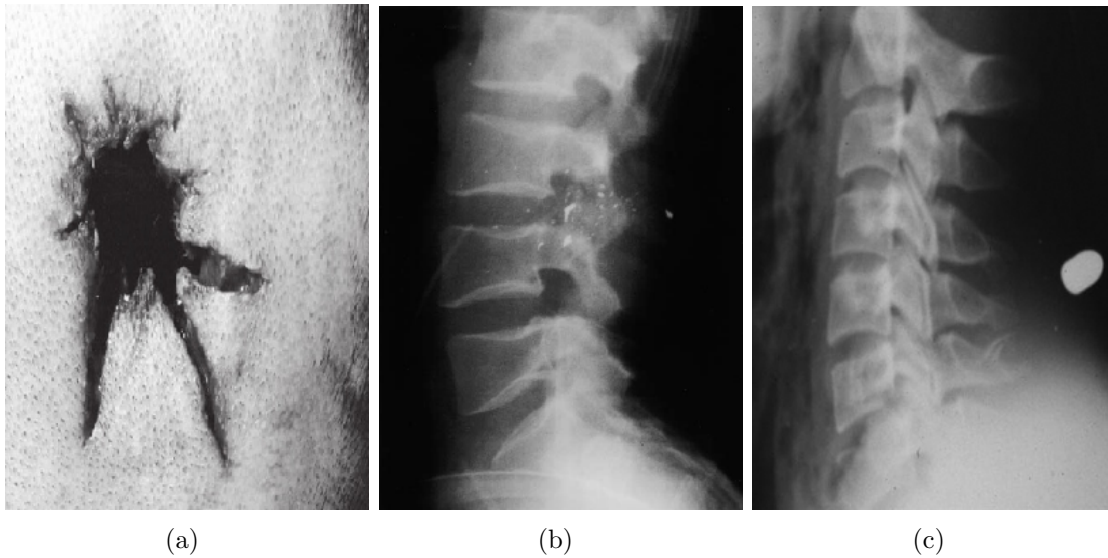


Fig. 2.8: Balística terminal: (a) Orifício padrão de entrada, resultante do contacto entre o projétil e a superfície da pele [12]; (b) radiografia lateral de um indivíduo com fratura da coluna lombar, causada por um projétil [38]; (c) radiografia lateral da região cervical de um indivíduo com projétil alojado nos tecidos moles, entre as vértebras C4 e C5 [39].

humano, e engloba um conjunto de elementos com grande interesse do ponto de vista médico-legal:

- Orla de contusão: área da pele, que se situa em torno do orifício de entrada do projétil e que apresenta contusão e erosão. Por vezes, surge também no orifício de saída, sempre que a pele seja contundida contra uma superfície dura;
- Zona de limpeza: região do tecido que compreende os bordos do orifício e orla de contusão, podendo eventualmente ultrapassá-la. Corresponde à zona de deposição de elementos da nuvem de resíduos que são transportados na superfície do projétil;
- Área de equimose: região da pele em torno do orifício que apresenta equimose (infiltração de sangue nos tecidos, causada por rutura de capilares);
- Área de depósito da nuvem de resíduos: região da pele onde ocorre depósito de elementos constitutivos da nuvem de resíduos (conjunto de elementos orgânicos e inorgânicos que se encontram em suspensão misturada nos gases sobreaquecidos que se exteriorizam sobre a forma de nuvem, pelo cano da arma, e pelos espaços existentes entre os componentes da arma) principalmente os resultantes da combustão da pólvora;

- Queimadura: em disparos de arma de fogo, podem por vezes ser observadas lesões de queimadura da pele, normalmente confinadas à região circundante do orifício de entrada [41].

O conhecimento das características deste tipo de orifícios permite revelar o ângulo de incidência do projétil, a forma da ponta do projétil, e se o projétil atravessou o indivíduo de frente para trás ou de trás para frente, dando informações acerca da possível posição do criminoso no momento do(s) disparo(s) [12, 41]. Para além da análise dos orifícios, a análise da presença da nuvem de resíduos é passível de ser realizada por diversas técnicas. Estas baseiam-se na deteção (e, por vezes, quantificação) da fração orgânica (constituída por materiais derivados do agente propulsor) ou da fração inorgânica (composta por materiais resultantes dos produtos de combustão do fulminante, e de metais provenientes do cano da arma, do projétil e do invólucro). O estudo da nuvem de resíduos reveste-se de especial interesse uma vez que, ao conhecer a composição das partículas microscópicas e a sua morfologia, é possível proceder à identificação exclusiva das partículas constituintes da nuvem, podendo ser um dado incriminatório se as mesmas forem encontradas num determinado indivíduo [41]. Assim, esta informação revela-se muito valiosa na reconstrução de um crime, pois permite comprovar ou refutar o incidente.

O padrão de dano provocado por uma arma de fogo é influenciado por cada um dos campos da balística descritos anteriormente, existindo diversas variáveis que controlam esses padrões. No entanto, muitos deles são mantidos constantes, se para cada disparo for utilizada a mesma arma e as mesmas munições [12].

Da mesma forma que a balística externa e terminal permitem revelar, entre outros, a provável posição de um criminoso no momento dos disparos, a balística interna, através da computação, apresenta um grande contributo no que à identificação da arma de fogo diz respeito. Como se pode constatar na secção anterior, o uso da computação na área das ciências forenses está fortemente estabelecido [1]. No entanto, nenhuma das ferramentas desenvolvidas permite afirmar com clareza que existe correspondência entre duas evidências, mesmo quando certificado por especialistas. Estas ferramentas apenas fornecem uma probabilidade viável que permite condenar um criminoso, ou apontar um suspeito como inocente [1, 42]. Quando um crime é cometido com uma arma de fogo, as evidências (arma de fogo, munições, invólucros e projéteis), se disponíveis, deverão ser devidamente recolhidas para que os especialistas as possam combinar com outras, no sentido de determinar que arma foi utilizada no disparo. Numa situação em que a arma de fogo é encontrada, deverão ser realizados disparos de teste com essa arma, com recurso a um meio de

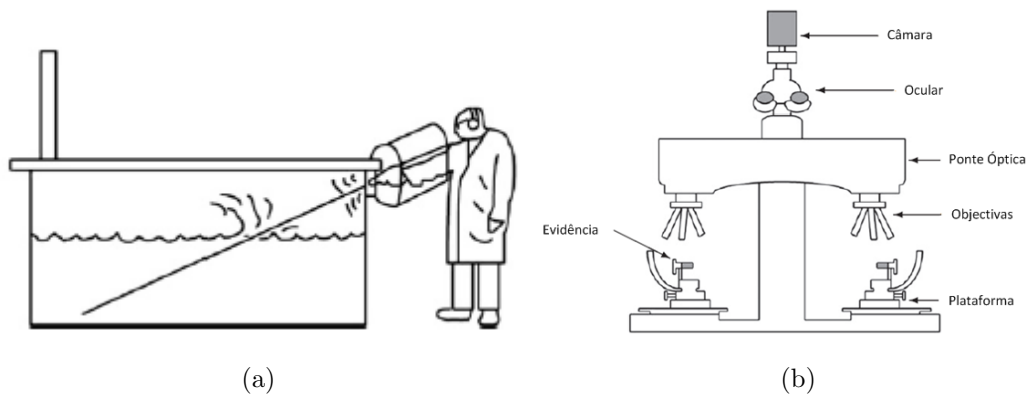


Fig. 2.9: Equipamentos utilizados em balística forense. (a) tanque de água para recuperação de projéteis no seu estado primitivo; (b) Microscópio óptico de comparação [1].

recuperação, como por exemplo um tanque de água como o ilustrado na Figura 2.9 (a), o qual permite a recuperação do projétil no estado original [1]. Os projéteis e invólucros resultantes dos disparos de teste (no mínimo dois disparos de teste) serão montados numa plataforma do microscópio de comparação (Figura 2.9 (b)), enquanto que o mesmo tipo de evidência encontrada no local do crime será montada na plataforma do lado oposto. De seguida, o examinador manipula as evidências de forma a obter alinhamento, na tentativa de confirmar ou eliminar a hipótese da arma de fogo ter deflagrado ambas evidências.

2.4.1 Bases de Dados

A análise e comparação de marcas em invólucros e projéteis, constitui um papel importante na investigação de um crime, e tradicionalmente, a sua comparação é realizada manualmente por peritos, com recurso ao microscópio de comparação. No entanto, esta abordagem revela-se muito demorada, e como tal, no início dos anos 90 começaram a ser desenvolvidos sistemas automáticos de comparação, para auxiliar os peritos no processamento de grandes volumes de evidências, tornando todo o processo mais eficiente [3, 4, 5]. Atualmente, o sistema IBIS (*Integrated Ballistics Identification System*) [6], desenvolvido pela *Forensic Technology Inc.*, constitui um dos mais avançados sistemas de identificação balística em bases de dados. A estação de trabalho do sistema IBIS é constituída por uma estação para aquisição de imagens e por uma estação para análise de imagens [5] (Figura 2.10). A estação de aquisição de dados, por sua vez, é constituída por um microscópio óptico capaz de gerar imagens



Fig. 2.10: Sistema IBIS; (a) Equipamento para aquisição de imagens; (b) estação de trabalho (análise de imagens) [6].

digitais de regiões da superfície do invólucro ou projétil [4]. A qualidade das imagens adquiridas está dependente da topografia da superfície (picos e vales), intensidade e direção da fonte luminosa, propriedades do material e reflexão na superfície da evidência [5]. Após a aquisição de imagens, estas são submetidas para a estação de trabalho, onde são comparadas com as imagens existentes numa base de dados [4]. Por fim, surge um *ranking* com as correspondências com maior similaridade. É importante referir que a base de dados do sistema IBIS apenas procura e sugere possíveis correspondências, sendo que a decisão final é sempre tomada pelo perito [3].

No ano de 1997, nos EUA, o Departamento do álcool, tabaco, armas de fogo e explosivos (ATF - *Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms, and Explosives*) em conjunto com o Instituto Nacional de Normalização e Tecnologia (NIST - *National Institute of Standards and Technology*) formaram o NIBIN (*National Integrated Ballistic Information Network*), de forma a ampliar a informação disponível aos peritos e permitir rápidos resultados na comparação entre evidências presentes na base de dados e evidências colhidas no local do crime [3]. Este importante avanço deve-se ao facto de várias organizações policiais terem participado na sua construção, contribuindo com imagens de projéteis e invólucros recolhidos em cenas de crime e em disparos de teste [3]. No entanto, surgiu a necessidade de uniformizar todo o processo e garantir o controlo de qualidade das organizações segundo a norma ISO 17025 [43], e como tal, NIST em colaboração com ATF desenvolveram evidências padrão (2460 projéteis e 2461 invólucros) e ainda sistemas de medição e correlação 2D e 3D para assinaturas em balística [44, 45, 46]. Assim surge o *National Ballistics Imaging Comparison* (NBIC). Este projeto tem como objetivo estabelecer rastreabilidade e um sistema

de qualidade a nível nacional, utilizando evidências padrão na aquisição e correlação, assim como explorar e detetar qualquer problema decorrente do processo de aquisição, no software IBIS, na rede ou até nas evidências padrão [44].

Atualmente, as barreiras, distâncias e fronteiras estão minimizadas, graças aos avanços tecnológicos do mundo globalizado, intensificando-se o fluxo de pessoas, informações e capitais. Nos últimos anos, as organizações criminosas ultrapassaram as fronteiras geográficas dos países, com o objetivo de obter maiores resultados nas suas operações e para assegurar proteção e impunidade dos seus agentes. A globalização do crime e a perda de controlo eficaz nas fronteiras, levaram ao desenvolvimento do sistema IBIN (*INTERPOL Ballistic Information Network*), criado pela INTERPOL (*International Police*) [47]. A INTERPOL é considerada a maior organização policial a nível internacional, encontrando-se em 190 países. Fundada em 1923, tem como objetivo suportar e assistir todas as organizações e serviços cuja missão é prevenir o crime internacional [48]. Cada um dos países membros tem a responsabilidade de estabelecer e manter o seu Escritório Nacional Central (*National Central Bureau - NCB*), que através da rede I-24/7 interage com a secretaria geral da INTERPOL [49]. Em Portugal, a INTERPOL está sediada na unidade de cooperação internacional da Polícia Judiciária [48].

A rede IBIN utiliza tecnologia que permite adquirir e catalogar os achados em evidências balísticas, como por exemplo o sistema IBIS, de forma a que todos os países membros possam partilhar e comparar grandes quantidades de evidências. Trata-se de uma plataforma, que transporta o sistema IBIS do nível nacional para o nível internacional. A adesão à rede IBIN, permite aos países membros tornarem-se parte de uma rede internacional, e como tal, podem comparar as suas evidências com evidências de bases de dados de outros países. Esta plataforma permite ainda fornecer pistas essenciais para localizar conexões entre crimes cometidos em diferentes países. Por fim, pretende-se que com a evolução desta rede internacional seja possível a obtenção de dados estatísticos, através de técnicas de inteligência artificial, sobre o movimento de armas de fogo ilegais no mundo.

Evidências Balísticas

Geralmente, os invólucros e projéteis deflagrados, encontrados na cena de crime, constituem evidências de grande importância, e podem indicar qual a arma responsável pelos disparos, e conseqüentemente, apontar um determinado indivíduo como suspeito [1, 2]. As marcas presentes nestas evidências são consideradas características de extrema importância na identificação forense, uma vez que representam as “impressões digitais” da arma que as deflagrou [50, 51, 52, 53]. No momento do disparo, as armas de fogo imprimem marcas microscópicas no invólucro e projétil, que são únicas, constituindo assim, um importante desafio no domínio da criminologia [7, 54, 55, 56]. Na investigação de um crime cometido por uma arma de fogo, esta nem sempre é recuperada, constituindo uma das maiores limitações no processo de investigação.

Neste capítulo será apresentada a terminologia utilizada para descrever as evidências balísticas, necessária para a sua identificação forense. As evidências balísticas consideradas para esta dissertação, são as armas de fogo, munições, invólucros e projéteis.

3.1 Armas de Fogo

De acordo com a lei das armas, publicada em Diário da República [57], a arma de fogo é definida como todo o engenho ou mecanismo portátil destinado a provocar a deflagração de uma carga propulsora geradora de uma massa de gases cuja expansão impele um ou mais projéteis. Consoante o grau de perigosidade, o fim a que se destina e a sua utilização, as armas de fogo são classificadas da seguinte forma:

- Classe A: armas de fogo automáticas;

- Classe B: armas de fogo curtas de repetição ou semiautomáticas;
- Classe B1: pistolas semiautomáticas de calibre 6.35 mm e revólveres de calibre .32 S&W, .32 S&W *Long* e .32 H&R *Magnum*;
- Classe C:
 - armas de fogo longas semiautomáticas de repetição ou de disparo único (tiro a tiro), de cano estriado;
 - armas de fogo longas semiautomáticas de repetição ou de disparo único com dois ou mais canos, se um deles for estriado;
 - armas de fogo longas semiautomáticas ou de repetição, de cano liso, que não exceda os 60 cm;
 - armas de fogo curtas de disparo único unicamente aptas para disparar munições de percussão central;
 - armas de fogo de calibre até 6 mm ou .22 unicamente aptas para disparar munições de percussão anelar;
- Classe D:
 - armas de fogo longas semiautomáticas ou de repetição, de cano liso com comprimento superior a 60 cm;
 - armas de fogo longas semiautomáticas, de repetição ou de disparo único de cano estriado com comprimento superior a 60 cm, unicamente aptas a disparar munições próprias de cano liso;
 - armas de fogo longas de disparo único de cano liso;
- Classe E: armas de fogo unicamente aptas para disparar munições não metálicas;
- Classe F:
 - réplicas de armas de fogo;
 - armas de fogo inutilizadas quando destinadas a ornamentação;
- Classe D: armas veterinárias;

Nesta secção será apresentada a nomenclatura associada às armas de fogo e os principais mecanismos que imprimem marcas nos invólucros e projéteis aquando do momento do disparo.

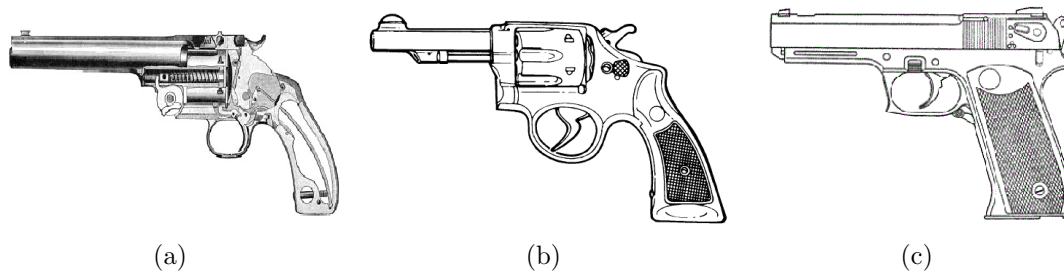


Fig. 3.1: Armas de fogo curtas: (a) Arma de fogo de disparo único; (b) Revolver; (c) Arma de fogo semiautomática.

3.1.1 Nomenclatura das Armas de Fogo

A nomenclatura das armas de fogo curtas é algo que não é consensual em todo mundo, e como tal, serão discutidas as suas diferenças e particularidades. No que respeita à nomenclatura inglesa, considera-se que todas as armas de fogo curtas são consideradas pistolas, e como tal, existem pistolas de disparo único, pistolas de revolver e pistolas semiautomáticas [58]. Ao contrário da nomenclatura inglesa, a nomenclatura americana é mais cuidadosa na terminologia aplicada, considerando revolver e pistola, termos distintos. O termo pistola refere-se a arma de disparo único ou a arma semiautomática. O termo automático, por sua vez, é por vezes utilizado de forma incorreta, e quando aplicado a armas de fogo curtas deverá ser usado com alguma prudência. Utilizado de forma correta, significa arma de disparo contínuo, até remoção do dedo do gatilho ou o compartimento do carregador estar vazio. Nas armas semiautomáticas, cada vez que se aciona o gatilho, apenas uma munição é deflagrada, apesar do carregamento ser automático.

Assim, de acordo com a nomenclatura americana, considera-se a existência de 3 tipos de armas de fogo curtas: as armas de fogo de disparo único (Figura 3.1(a)), os revólveres (Figura 3.1(b)) e as armas de fogo semiautomáticas (Figura 3.1(c)). No que respeita às armas de disparo único, estas são na sua maioria de calibre 0.22 LR (*Long Rifle*) [58]. Geralmente, o cano deste tipo de armas é articulado com a armação, e possui um mecanismo de bloqueio, para o manter em posição durante o disparo. Quando o mecanismo não se encontra bloqueado, o cano da arma oscila para baixo, permitindo a remoção do invólucro deflagrado e a inserção de uma nova munição [58]. Contrariamente às armas de disparo único, nos revólveres, o fornecimento de munições é realizado por um cilindro, situado na região posterior do cano da arma (Figura 3.2(a)). Premindo o gatilho, a munição alinhada com o

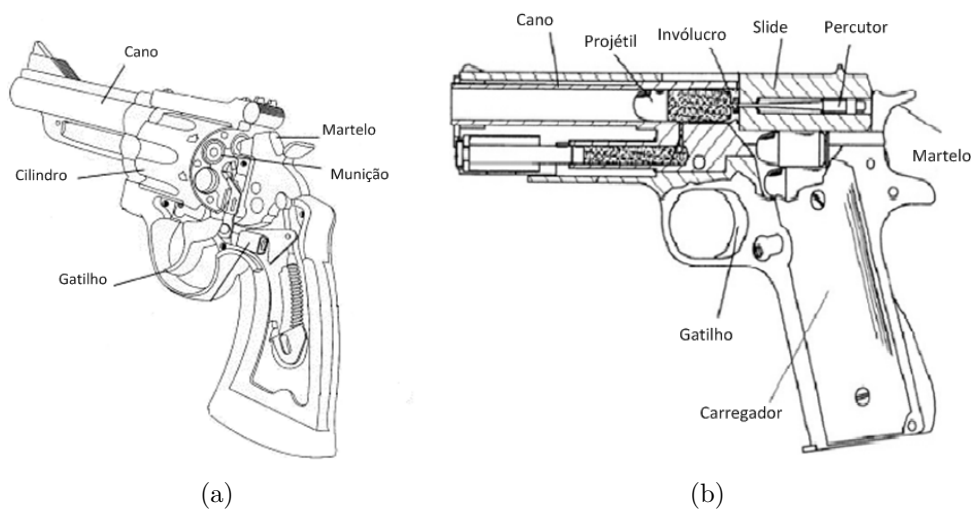


Fig. 3.2: Componentes das armas de fogo: (a) Revolver; (b) Pistola semiautomática/automática.

cano da arma é disparada, e o martelo vai originar a rotação do cilindro, para alinhar uma nova munição com o cano da arma. Ao mesmo tempo, o martelo posiciona-se, e o gatilho pode ser novamente acionado. Este modo de disparo é conhecido como ação dupla, uma vez que faz a rotação do cilindro e posiciona o martelo de uma só vez. Para além deste modo de disparo, existe o modo de disparo de ação única, que contrariamente ao mecanismo descrito anteriormente, é necessário o posicionamento manual do martelo. Neste modo, após o disparo, ocorre apenas rotação do cilindro [58].

Nas armas semiautomáticas, as munições encontram-se num compartimento de mola, alojado na estrutura para a mão, denominado carregador. O cano da arma está rodeado por uma estrutura que desliza sobre si (*Slide*), que quando puxada para trás, a munição presente no topo do carregador é transferida para a região anterior do cano da arma (Figura 3.2(b)). De seguida, o *Slide* avança para uma posição posterior, sob pressão de uma mola, empurrando a munição do carregador para o interior do cano da arma por ação da culatra. Premindo o gatilho, o martelo vai acionar o percutor, que por sua vez, vai embater na região do primário da munição, deflagrando-a, e originando a queima da mistura propulsora (pólvora e outros aditivos) de que resulta a produção de gás. A expansão dos gases irá transmitir uma força ao projétil, que é projetado para o exterior do cano da arma, e outra oposta, que força o *Slide* a movimentar-se para trás. Este movimento vai permitir que o invólucro deflagrado seja impulsionado através de uma abertura lateral situada na região anterior da

arma, através da sua colisão com o ejetor e extrator (Figura 3.3(a)). De seguida, o *Slide* avança novamente para uma posição posterior, por ação de uma mola, e uma nova munição é transferida do carregador para o cano da arma. No caso das armas semi-automáticas, a pressão sobre o gatilho deverá ser retirada, e de seguida re-aplicada, para efetuar novo disparo. Neste tipo de armas, existe um mecanismo (*Disconnecter*) que impede a conexão entre o gatilho e os restantes componentes da arma, no momento em que o gatilho é pressionado. Quando o gatilho deixa de ser pressionado, o mecanismo deixa de fazer efeito, e uma nova munição pode ser disparada [58].

3.1.2 Mecanismos de Impressão de Marcas

As armas de fogo imprimem marcas microscópicas únicas nos invólucros e projéteis deflagrados, à semelhança das impressões digitais, como descrito na secção 2.3.5. Estas marcas são, como tal, consideradas uma impressão digital da arma de fogo utilizada no disparo [3, 7]. Nesta secção serão abordados os componentes das armas de fogo, que no momento do disparo, imprimem marcas microscópicas nas evidências.

As marcas presentes num invólucro são produzidas pelo impacto com o percutor, culatra, ejetor e extrator [4]. No que respeita à marca do percutor (Figura 3.3(b)), normalmente, quando a sua extremidade entra em contacto com o primário central do invólucro (isto nas munições de percussão central), deixa uma impressão relativamente bem definida, com margens limpas. Contudo, em determinadas armas semiautomáticas, como é o caso da Glock 17, durante a fase de ejeção/extração do invólucro, este, por ação do ejetor e extrator, é impulsionado para o exterior da arma sem que o percutor esteja totalmente recolhido. Isto faz com que o percutor se arraste ao longo do primário do invólucro, criando uma marca distintiva. Esta marca é conhecida vulgarmente por *marca de arrasto* ou *marca de língua* [1]. Após a munição ser deflagrada, uma força oposta ao movimento do projétil vai obrigar o invólucro a mover-se para trás e a colidir com a culatra, extrator e ejetor (Figura 3.3(a)), fazendo com que este seja expelido para o exterior da arma. Esta colisão irá originar a impressão de marcas microscópicas respetivas aos constituintes da arma referidos (culatra, extrator e ejetor).

As estrias presentes num projétil, por sua vez, são produzidas pelo contacto durante sua passagem ao longo do cano da arma [4, 53]. O interior do cano de uma arma normalmente é estriado em espiral (dextrogira ou levogira), no sentido de transferir movimento de rotação ao projétil. Este movimento de rotação garante

a estabilidade giroscópica do projétil durante a sua trajetória de voo. O interior do cano consiste essencialmente numa superfície circular (*lands*) que contém sulcos (*grooves*) intervalados, com uma distância constante entre si, que é função do passo da espiral talhada no interior do cano da arma (Figura 3.3 (c e d)) [18, 1, 58]. No que respeita à forma dos sulcos, existem várias configurações, entre as quais, quadrada, circular e triangular [58]. Quando deflagrado, o projétil em contacto com a superfície interna do cano adquire marcas na sua superfície. O número de sulcos, a largura de cada um deles e a direção de torção das estrias do cano da arma, constituem parâmetros importantes na identificação de uma arma de fogo [1]. Estas marcas são utilizadas para correlacionar o projétil com uma determinada arma de fogo problema, e resultam de imperfeições microscópicas adquiridas no processo de fabrico e do desgaste do cano da arma ao longo do tempo.

3.2 Munições

A identificação de uma munição é importante para todos aqueles que trabalham com este tipo de componentes, seja na identificação forense de armas de fogo, informações militares ou até para colecionadores deste tipo de objetos [59]. Para que a sua identificação seja possível, é necessário conhecer a terminologia associada e as características que as diferenciam umas das outras, uma vez que existem atualmente centenas de munições distintas em todo o mundo. Nesta secção será apresentada a terminologia necessária para a discussão e compreensão do vocabulário relativo a munições de armas curtas. Uma munição é constituída essencialmente por um invólucro, um primário, uma carga propulsora (pólvora) e um projétil, como apresentado na Figura 3.4 [53, 58, 60]. Depois de deflagrada, a munição vai originar duas novas evidências: o invólucro e o projétil.

3.3 Invólucros

Os invólucros são normalmente constituídos por uma liga de bronze, com uma composição de 70% de cobre e 30% de zinco. A sua principal função é armazenar a carga propulsora (pólvora), dar inserção ao primário (normalmente na parte central da sua base, isto em munições com percussão central), unir toda a estrutura da munição, e vedar a porção anterior da munição da fuga de gases [1, 60]. Quando uma munição é deflagrada, a pressão do gás produzido pela combustão da pólvora ex-

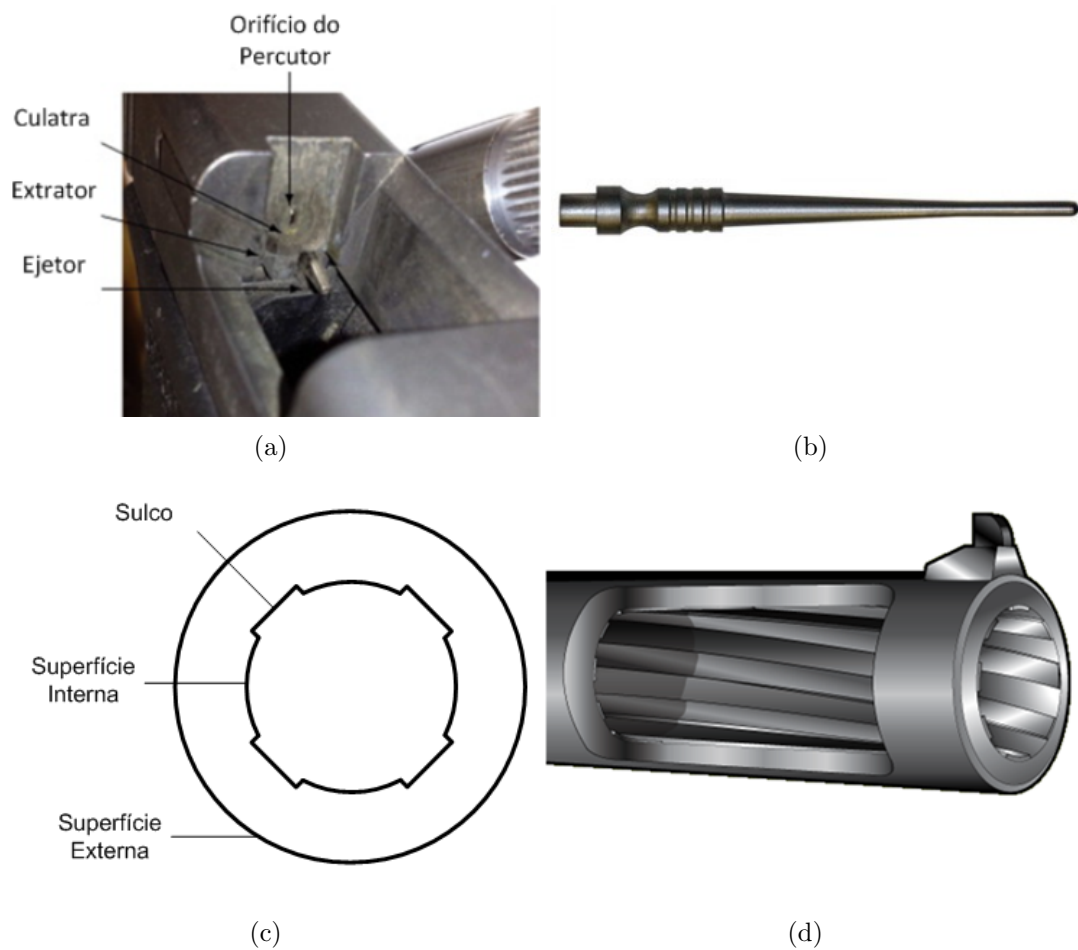


Fig. 3.3: Mecanismos de marcas em invólucros e projéteis. (a) Região anterior do cano da arma. Legenda dos principais mecanismos de impressão de marcas em invólucros; (b) Percutor; (c) Desenho esquemático do interior estriado do cano da arma; (d) Região posterior do cano da arma com vista para o seu interior estriado.



Fig. 3.4: Constituição de uma Munição (fonte: <http://firearmshistory.blogspot.pt/>).

pande o invólucro contra as paredes do interior da arma. Se o material do invólucro for temperado com a dureza correta, irá voltar à sua dimensão original, facilitando a extração do invólucro da arma. Caso contrário, a extração tornar-se-a dificultada, e por vezes, o invólucro parte-se [60].

3.3.1 Nomenclatura dos Invólucros

Os invólucros são classificados com base na forma, tipo de anel (ou rebordo) e tipo de percussão [59]. No que respeita à forma dos invólucros, existem duas configurações: afunilada (*bottleneck*) e em linha reta (*straight*) [60]. A configuração dos invólucros e respetiva legenda pode ser visualizada na Figura 3.5. O *design* afunilado permite que uma maior quantidade de carga propulsora seja inserida no invólucro, uma vez que o seu diâmetro (e volume) é superior ao de um invólucro com *design* em linha reta [60]. Em armas de fogo semiautomáticas e revólveres, as munições com invólucros em linha reta são normalmente as mais utilizadas. No que diz respeito ao tipo de anel (ou rebordo), os invólucros são classificados em 5 tipos distintos [58, 59, 60]:

1. *Rimmed*: caracterizado pelo anel ou rebordo extrator de maior diâmetro que a base do invólucro;
2. *Semi-rimmed*: possui o anel ligeiramente maior em diâmetro que a base, e a região do primário, que se situa entre o anel e a base, geralmente é mais rebaixada, quando comparada com invólucro do tipo *Rimmed*;

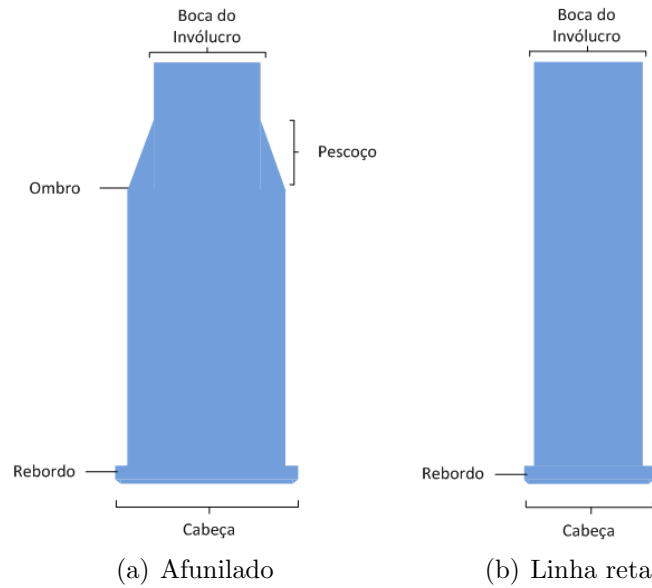


Fig. 3.5: Forma dos invólucros.

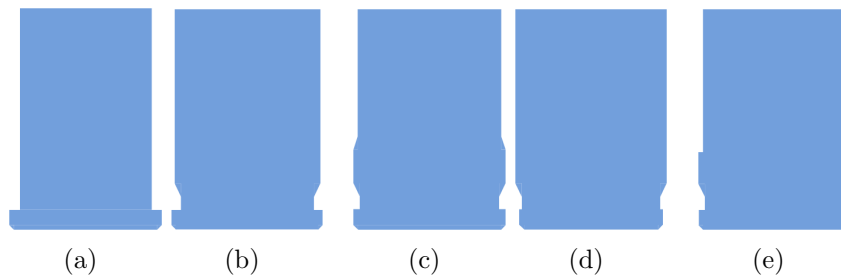


Fig. 3.6: Diferentes tipos de rebordo de um invólucro. (a) *Rimmed*; (b) *Semi-rimmed*; (c) *Rimless*; (d) *Rebated*; (e) *Belted*.

3. *Rimless*: possui o anel com o mesmo diâmetro que a base. Este tipo de invólucros são os mais utilizados em regime militar;
4. *Rebated*: caracterizado pelo anel de diâmetro menor que o da base, para além de um sulco extrator entre o anel e a base. Não existem muitos invólucros com este design, e normalmente são fáceis de identificar;
5. *Belted*: possui um cinto distinto na região da base, e um sulco ou ranhura entre o anel e o cinto.

A combinação do tipo de anel com a forma do invólucro, origina os 10 tipos de invólucros existentes atualmente:

1. Rimmed bottleneck

2. Rimmed straight
3. Rimless bottleneck
4. Rimless straight
5. Belted bottleneck
6. Belted straight
7. Semi-rimmed bottleneck
8. Semi-rimmed straight
9. Rebated bottleneck
10. Rebated straight

Relativamente ao tipo de percussão, os invólucros podem ser de percussão central (*center fire*) ou de percussão anelar (*rim fire*). Nos invólucros de percussão central, o primário (Figura 3.8) encontra-se localizado na região central da base do invólucro. Este constituinte do invólucro funciona como um iniciador (primário), que tem como função inflamar a pólvora no momento da ignição. No que diz respeito à sua configuração, este tipo de percussão pode ainda ser subdividido em dois tipos distintos: *Boxer* e *Berdan* [58, 60]. O primário do tipo *Boxer* (Figura 3.7(a)), difere do primário do tipo *Berdan* (Figura 3.7(b)), essencialmente no que ao número de orifícios de ignição diz respeito (um orifício nos de tipo *Boxer* e dois orifícios nos de tipo *Berdan*). Por sua vez, nos invólucros com percussão anelar, o composto explosivo primário encontra-se distribuído no rebordo (anel) da face do invólucro (Figura 3.7(c)). De um modo geral, todos os invólucros possuem uma espécie de carimbo, mais conhecido por *headstamp*, na região da face do invólucro. Em invólucros com percussão central, o conjunto de caracteres que constitui o *headstamp* localiza-se entre a região do primário e o círculo exterior da face do invólucro [7], enquanto que em invólucros com percussão anelar, encontra-se no centro da face do invólucro. O *headstamp* é constituído por letras, números, símbolos e nomes comerciais, e é imprimido em relevo na face do invólucro para fins de identificação [60]. Os invólucros comerciais são normalmente marcados com as iniciais ou código do fabricante, e com o calibre da munição, enquanto que os invólucros utilizados em ambiente militar, incluem o calibre, data e local de fabrico, entre outros [59]. No passado, foram fabricados invólucros cujo *headstamp* se encontrava segmentado

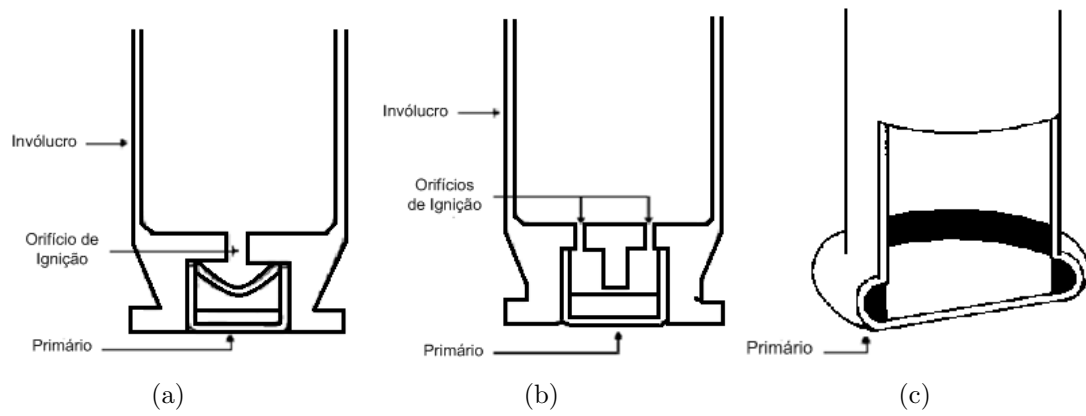


Fig. 3.7: Tipos de percussão: (a) Central: Boxer ; (b) Central: Berdan; (c) Anelar [60].

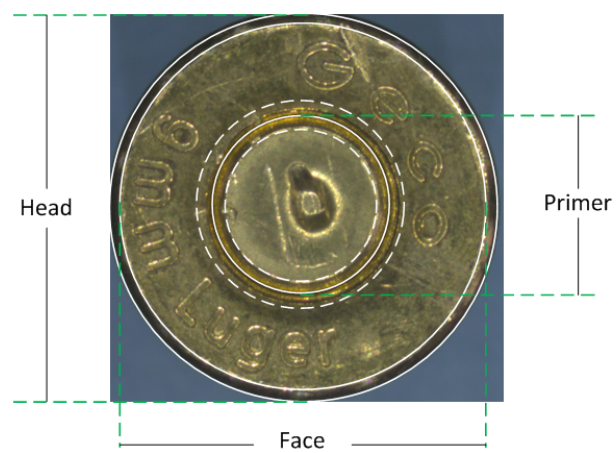


Fig. 3.8: Constituintes da região da base do invólucro.

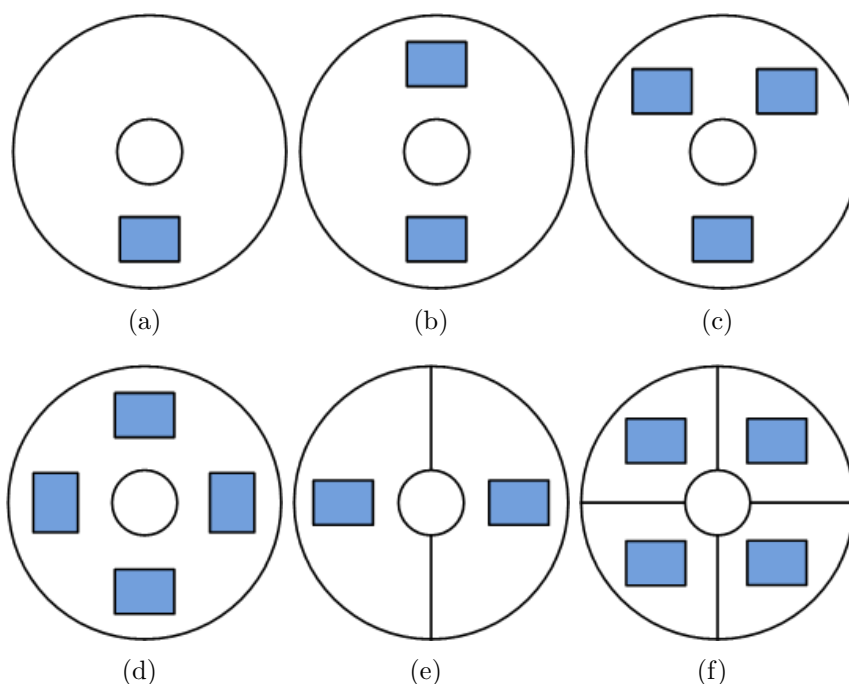


Fig. 3.9: *HeadStamps*. (a) Elemento único: 6 horas; (b) Elemento duplo: 6 e 12 horas; (c) Elemento triplo: 2, 6 e 10 horas; (d) Elemento quádruplo: 3, 6, 9 e 12 horas; (e) Duplo segmentado: 3 e 9 horas; (f) Quádruplo segmentado: 2, 4, 8 e 10 horas.

(Figura 3.9 (e) e (f)), ou seja, possuía linhas que dividiam a face no invólucro em 2 ou 4 partes iguais. Com o passar dos anos, este design caiu em desuso, e hoje em dia, é mais conveniente a orientação segundo os ponteiros do relógio. Assim, as 12 horas indicam o topo, as 3 horas indicam a direita, as 6 horas indicam a região inferior e as 9 horas indicam a esquerda (Figura 3.9 (a), (b) e (d)) [59]. Em todo mundo, existem mais de 800 *headstamps* em ambiente militar, e mais de 400 *headstamps* comerciais. Por vezes, ocorre sobreposição do *headstamp* com marcas características da culatra e do ejetor, e como tal, pode constituir informação enganosa no posterior processo de comparação de evidências. De forma a evitar que tal aconteça, os caracteres que constituem o *headstamp* podem ser detetados e eliminados, com recurso a técnicas de processamento de imagem [7].

3.3.2 Marcas em Invólucros Deflagrados

Depois de deflagrados, os invólucros adquirem marcas microscópicas, devido ao seu contacto com os mecanismos da arma de fogo (Figura 3.3 (a) e (b)), referidos na secção 3.1.2, aquando do disparo e ejeção/extração do invólucro [1, 7, 50, 19]. Na

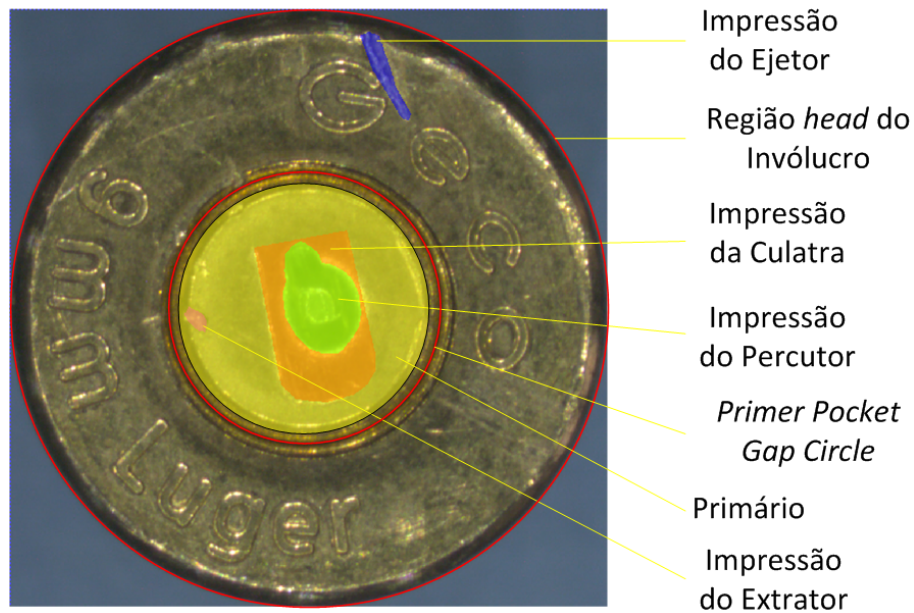


Fig. 3.10: Regiões e principais marcas da região da base do invólucro.

região da base do invólucro são analisadas 4 marcas, com o propósito de determinar possíveis semelhanças com evidências de uma base de dados [50]. São elas, a marca do percutor, marca do ejetor, marca do extrator e marca da culatra (Figura 3.10) [61, 52, 54, 62]. A marca do percutor constitui um dos mais importantes achados em balística forense e geralmente apresenta um contorno circular. No entanto, por vezes possui contornos elípticos, retangulares ou quadrados. De forma a situar estes achados na região da base do invólucro, são definidos 3 contornos circulares. São eles, o círculo do primário, *Primer Pocket Gap Circle* e círculo da região da base do invólucro (Figura 3.10).

Para o estudo dos achados em evidências balísticas, várias tecnologias de aquisição de imagem têm sido desenvolvidas desde a década de 70, entre as quais, a microscopia eletrónica de varrimento, câmeras CCD (*Charge-Coupled Device*) de digitalização, varrimento laser e ultra-sons [1].

3.4 Projéteis

O projétil é o constituinte da munição que abandona o cano da arma, quando esta é deflagrada. No passado, esta evidência tinha uma forma esférica e a sua constituição era à base de chumbo, apresentando uma precisão muito baixa e pequeno alcance [60]. Com o passar dos anos, a sua configuração foi-se alterando, e novos materiais

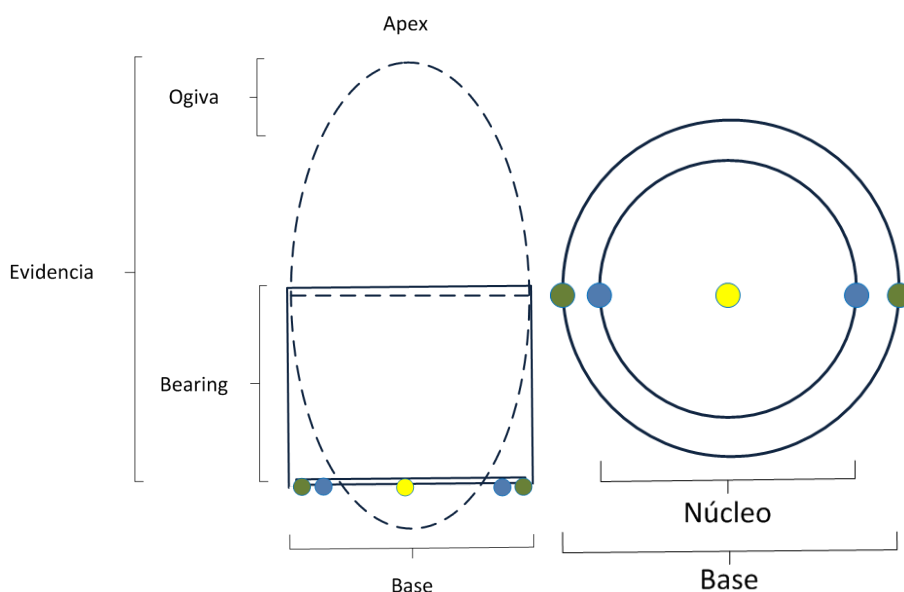


Fig. 3.11: Modelo geométrico de um projétil.

foram implementados na sua construção, no sentido de aumentar o seu desempenho. A configuração dos projéteis e respetiva legenda, é esquematizada na Figura 3.11, onde é apresentado um modelo geométrico exemplificativo.

3.4.1 Nomenclatura dos Projéteis

Os projéteis modernos dividem-se em duas categorias principais: projéteis de chumbo (não revestidos) e projéteis revestidos por uma liga metálica [60, 59]. Os projéteis de chumbo são tradicionalmente utilizados em revólver e em munições de calibre .22 com tipo de percussão anelar. Quando utilizados em armas de fogo com percussão central, os projéteis de chumbo podem-se fragmentar, devido à velocidade extremamente elevada com que atravessam o cano da arma. Por vezes, é adicionado ao chumbo antimónio e/ou estanho, para aumentar a dureza da liga, assim como um composto de lubrificação, para ajudar a prevenir a incrustação do chumbo no cano da arma.

Os projéteis revestidos por liga metálica, por sua vez, são normalmente utilizados em armas de fogo automáticas e semiautomáticas, suportando uma velocidade elevada ao longo do cano da arma devido ao revestimento, que o impede de se fragmentar [60]. Este tipo de projétil apresenta normalmente um núcleo de chumbo ou aço, revestido por metal dourado de cobre e zinco, cobre e níquel, ou alumínio. Por vezes, encontra-se no revestimento do projétil um sulco, ou estria (*cannelure*), que



Fig. 3.12: Projéteis com revestimento parcial metálico. (a) *Semi-jacketed soft-point*; (b) *Semi-jacketed hollow-point*.

é utilizado para o cravar ao invólucro, durante o processo de fabrico. Os projéteis com revestimento podem ser subdivididos em projéteis com revestimento total (*total metal-jacketed* - TMJ), projéteis com revestimento metálico completo (*full metal-jacketed* - FMJ) e projéteis com revestimento metálico parcial (*partial metal-jacketed* - PMJ). A diferença entre os projéteis com revestimento total e revestimento completo relaciona-se com o fato dos primeiros apresentarem revestimento metálico em todo o projétil, enquanto que o segundo não apresenta revestimento na região da base (Figura 3.11).

As duas formas mais comuns de projéteis com revestimento parcial são *semi-jacketed soft-point* (JSP) (Figura 3.12(a)) e *semi-jacketed hollow-point* (JHP) (Figura 3.12(b)). Nos projéteis do tipo *semi-jacketed soft-point* uma percentagem variável de chumbo é exposta, dependendo do desenho do projétil. Quanto ao revestimento, na sua junção com o núcleo de chumbo exposto, pode ser recortado ou dentado, para permitir a expansão do projétil. Os projéteis do tipo *semi-jacketed hollow-point*, por sua vez, apresentam extremidade oca, e o revestimento parcial de metal pode ser recortado ou dentado, para auxiliar a expansão após a colisão com o alvo.

No que diz respeito aos projéteis com revestimento completo, estes são maioritariamente encontrados em exemplares com configuração do tipo *Semi-Wadcutter* e *Wadcutter*. Nesta classe de projéteis, o núcleo de chumbo está totalmente coberto por uma fina camada de cobre. No que concerne à forma dos projéteis, existem 5

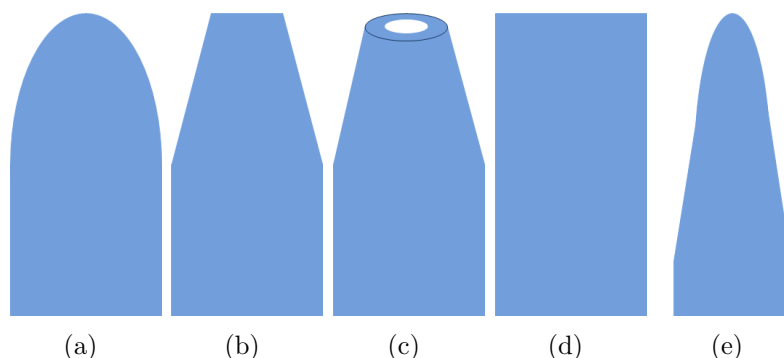


Fig. 3.13: Configurações básicas dos projéteis. (a) *Round Nose*; (b) *Semi-Wadcutter*; (c) *Hollow-Point*; (d) *Wadcutter*; (e) *Sharp Pointed*.

configurações básicas (Figura 3.13) [12, 60, 59]:

1. *Round Nose*: com forma cônica e base achatada;
2. *Semi-Wadcutter*: forma cônica com extremidade plana e rebordo acentuado com diâmetro igual ao da base do projétil;
3. *Hollow-Point*: com uma configuração semelhante aos projéteis *Semi-Wadcutter*, apresentando no entanto uma cavidade na extremidade, que facilita a expansão do projétil após o impacto com o alvo;
4. *Wadcutter*: assemelha-se a um cilindro, e a sua base pode ser chanfrada ou oca;
5. *Sharp Pointed*: com uma configuração alongada e extremidade afiada.

3.4.2 Marcas em Projéteis Deflagrados

O interior do cano de uma arma de fogo, à exceção de algumas armas de cano liso, contém estrias, as quais permitem que os projéteis deflagrados obtenham movimento de rotação, no sentido de aumentar a sua estabilidade durante a trajetória de voo. Quando uma munição é deflagrada, essas características topográficas do interior do cano, produzem marcas na superfície do projétil com que se encontra em contacto (*bearing*) [5]. Enquanto que as características topográficas macroscópicas representam características comuns de um grupo de armas de fogo fabricadas com o mesmo *design* de cano, fabricante e processo de fabrico, as características individuais associadas às características topográficas microscópicas, representam características únicas de uma só arma.

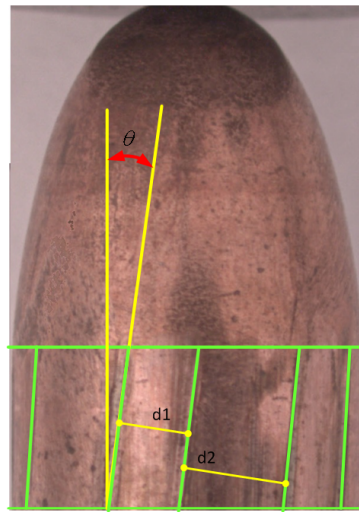


Fig. 3.14: Estrias presentes em projéteis. (θ) ângulo de torção da estria; (d1) largura da estria; (d2) distância entre estrias.

As características relevantes para estudo dos projéteis incluem o calibre do cano da arma, a forma, o número e a largura das estrias, assim como a sua direção e ângulo de torção, e distância entre estrias [63, 51]. No que respeita ao ângulo de torção, a impressão das estrias em cada secção transversal ao eixo perpendicular do projétil deverá ser muito semelhante [1, 5]. A sua determinação é possível pela medição do ângulo formado pela reta coincidente com a estria e uma reta perpendicular à base do projétil, como é possível visualizar na Figura 3.14 . A informação obtida com base nestas características, permite reduzir o tempo e o esforço efetuado em correlações subsequentes.

3.5 Recolha de Evidências

As evidências balísticas, podem ser obtidas de 3 formas distintas no que respeita às circunstâncias de disparo realizadas. Estas podem ser encontradas na cena de crime, obtidas a partir de disparos de teste e de disparos de treino. Os disparos de teste são realizados sempre que uma arma é encontrada, e há necessidade de comparar as marcas que esta imprime nos invólucros e projéteis, com evidências de uma base de dados, no sentido de determinar, ou não, se a arma foi responsável pelo(s) disparo(s) realizados numa cena de crime [1]. Desta forma, são realizados disparos de teste para um meio de recuperação, para posteriormente se estabelecer comparação entre as evidências resultantes desses disparos e os invólucros ou projéteis encontrados na cena de crime [1, 12]. No que diz respeito aos disparos



Fig. 3.15: Armas de fogo curtas utilizadas nos disparos de treino, realizados no âmbito do presente trabalho.

de treino, estes são normalmente realizados pelas forças policiais e outras forças de segurança para a execução das práticas e experiências com armamento de treino ou real. No âmbito deste trabalho, foram realizados disparos de treino, no sentido de se colecionar um conjunto de invólucros e projéteis para estudo. Para tal, foram utilizadas 6 armas de fogo curtas (Figura 3.15), cujas especificações são apresentadas na Tabela 3.1. Nos disparos realizados, foram utilizadas 5 munições de calibres diferentes. As suas especificações, assim como a relação entre estas e as armas de fogo utilizadas nos disparos de treino, são apresentadas nas Tabelas 3.2 e 3.3, respetivamente. Após os disparos, os invólucros e projéteis resultantes (Figura 3.16), foram recolhidos, individualizados, etiquetados e enviados para laboratório para se proceder à sua documentação e aquisição de imagens de microscopia. Na etiqueta associada a cada uma dessas evidências (Figura 3.17) é indicada a inicial do tipo de evidência ((C)artridge Case-invólucro ou (B)ullet-projétil) e respetivo ID (número de identificação), o ID da arma de fogo utilizada no disparo, e o ID do modelo da munição que a originou. No final da sessão de treino reuniu-se o conjunto de evidências constituído por invólucros e projéteis.

Devido ao facto de existirem apenas duas armas de fogo (*Glock 17* e *Walther P38*) com o mesmo calibre, apenas os invólucros por elas deflagrados foram considerados para comparação, uma vez que não faz sentido comparar evidências de diferentes

Tab. 3.1: Especificações das armas de fogo utilizadas nos disparos de treino, realizados no âmbito do presente trabalho.

Arma de Fogo	Especificações				
	Calibre	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Massa (g)
Glock 17	9mm	186	136	30	625
Walther P38	9mm	214	136	29.5	780
Walther TPH	6.35mm	135	95	23	325
CZ75 Kadete	.22	206	139	37	1080
Smith & Wesson 66-4	357Mag	235	125	37	1020
Ruger SP 101	.32	200	130	35	700

Tab. 3.2: Especificações das munições utilizadas em disparos de treino, realizados no âmbito do presente trabalho.

Nome	Tipo Projétil	Calibre	Massa (g) Projétil	Percussão
9mmLuger	FMJ	9.01mm	8	center fire
6.35Auto	FMJ	6.35mm	3.2	center fire
T22LongRifle	Pb	.22	2.6	rim fire
357Magnum	JSP	357Mag	10	center fire
.32H&RMagnum	JHP	32H&RMag	5.5	center fire

Tab. 3.3: Relação entre armas de fogo e respectivas munições deflagradas.

Arma de Fogo	Munição
Glock 17	9 mm Luger
Walther P38	9 mm Luger
Walther TPH	6.35 Auto
CZ 75	T22 Long Rifle
Smith & Wesson 66-4	357 Magnum
Ruger SP 101	.32 H&R Magnum



(a) Invólucros



(b) Projéteis

Fig. 3.16: Evidências resultantes dos disparos de treino, realizados no âmbito do presente trabalho.

calibres. No entanto, os restantes invólucros foram documentados. Assim, foram definidos 2 grupos de invólucros:

1. Deflagrados pela arma de fogo *Glock* 17: [CID1-CID6] e [CID28-CID44];
2. Deflagrados pela arma de fogo *Walther* P38: [CID7-CID12] e CID27.

3.6 Documentação e Medição de Evidências Balísticas

Após a recolha das evidências, estas foram enviadas para o laboratório, e registadas numa base de dados todos os parâmetros que as caracterizam. Para a documentação das evidências, é necessário domínio da nomenclatura das mesmas para o preenchimento dos campos da base de dados relativos às regiões das evidências, uma balança

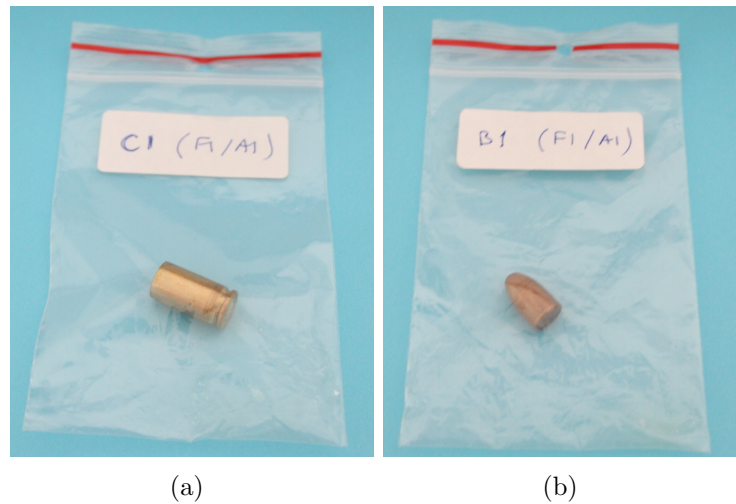


Fig. 3.17: Evidências balísticas individualizadas e etiquetadas.

para medição da massa e um paquímetro digital para medição de distâncias de determinadas regiões importantes para estudo. Para a medição da massa foi utilizada uma balança eletrônica, da marca Mettler, modelo AE 200 (Figura 3.18(a)), com capacidade máxima de pesagem de 205 g e resolução de 0,0001 g. O procedimento correto consiste no estabelecimento do ponto de calibração igual a zero, colocação da evidência no prato e leitura do valor da massa no visor digital. No que respeita à medição de distâncias nas evidências, foi utilizado um paquímetro da marca Mitutoyo, modelo CD-15 CPX (Figura 3.18(b)), com amplitude máxima de e resolução de 0,01 mm.

Assim, para cada uma das evidências, recolhidas de forma ordenada e individualizada, procedeu-se à medição dos seus parâmetros físicos e estes foram registados em base de dados.

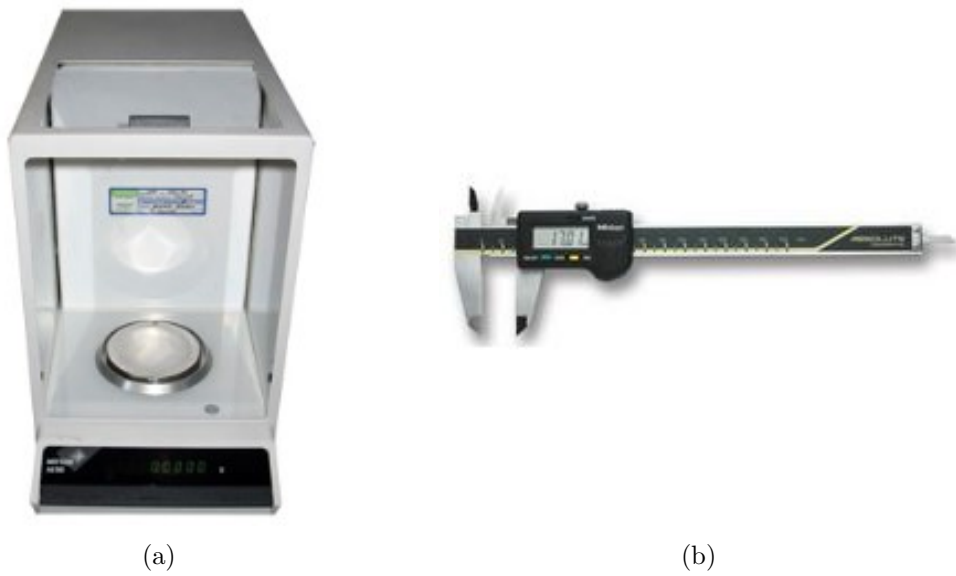


Fig. 3.18: Instrumentos utilizados para medições físicas de evidências balísticas. (a) Balança eletrônica da marca Mettler, modelo AE 200; (b) Paquímetro digital da marca Mitutoyo, modelo CD-15CPX.

Aquisição de Imagem de Evidências Balísticas

4.1 Modalidades de Imagiologia

O estudo de achados em ciências forenses, ocasionalmente requer, instrumentos que permitam obter a sua imagem ampliada, com a finalidade de estudá-las o mais detalhadamente possível. Neste sentido, existe um vasto conjunto de diferentes sistemas de aquisição de imagem, desenvolvidos com o propósito de investigar evidências balísticas. Nesta secção, serão apresentados alguns desses sistemas, assim como os resultados consequentes da sua implementação.

4.1.1 Tomografia Computorizada

A Tomografia Computorizada é um método de aquisição de imagem 3D, a qual se forma a partir de um conjunto de imagens 2D obtidas pela projeção em várias direções de feixes de raios-X através de um objeto. As imagens projetadas são formadas num detetor de raios-X que sofre atenuação de energia, e estão dependentes da densidade e da espessura do objeto na direção do feixe [64]. Cada uma das imagens projetadas transporta informação da atenuação dos raios-X através de diferentes elementos de volume (*voxel*), em diferentes direções do objeto, e estas são combinadas, por algoritmos de reconstrução de imagem, de forma a obter-se uma representação volumétrica do objeto tridimensional.

Esta modalidade imagiológica tem sido aplicada em balística forense com o propósito de obter uma imagem tridimensional representativa da superfície de evidên-

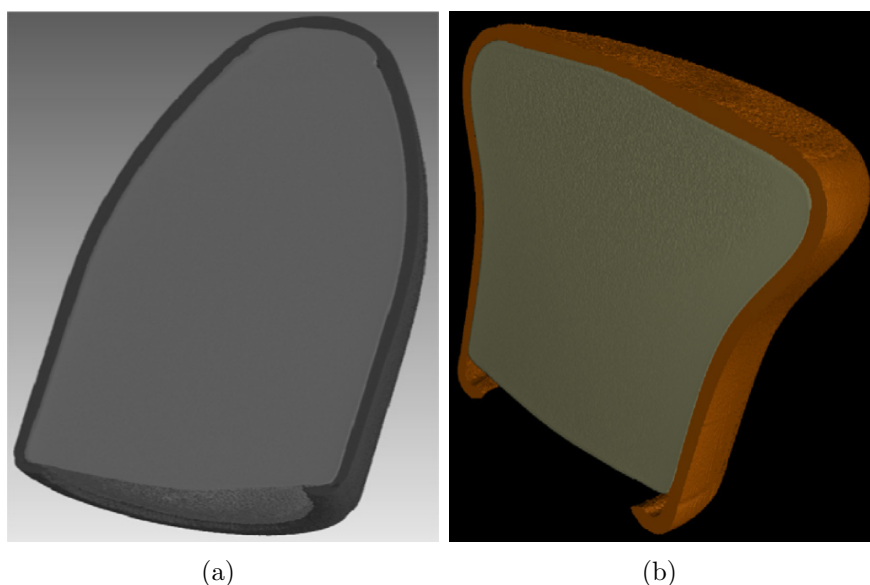


Fig. 4.1: Imagens resultantes da modalidade de aquisição de imagem, Tomografia Computorizada. Corte seccional de uma imagem 3D de um projétil (a) antes de sofrer impacto; (b) após o impacto [64].

cias, e, para além disso, determinar o centro de gravidade do projétil e espessura do seu revestimento, através de cortes seccionais na imagem 3D. Estes parâmetros são determinados através do cálculo de variações entre imagens do projétil antes e após ser deflagrado. Na Figura 4.1 são apresentadas imagens obtidas através da reconstrução tridimensional, de imagens adquiridas a partir da modalidade de Tomografia Computorizada.

4.1.2 Microscopia Eletrónica de Varrimento

A importância da área de investigação forense tem vindo a aumentar, e simultaneamente, o papel do Microscópio Eletrónico de Varrimento tem-se tornado mais significativo. Devido à capacidade de examinar detalhadamente uma vasta gama de materiais, com níveis variáveis de ampliação e com excelente profundidade de foco, este sistema de aquisição de imagem tornou-se uma ferramenta indispensável não só na área da balística, como nas restantes áreas [65]. A Microscopia Eletrónica de Varrimento, constitui um sistema de aquisição de imagem que tem como princípio a emissão de um feixe bem definido de eletrões em direção a um alvo. Estes, por sua vez, vão colidir com os eletrões da superfície do alvo e são devolvidos para um detetor, que os transforma em imagens de luz visível. Este sistema apresenta uma resolução de imagem na ordem dos micrómetros, e excelentes resultados na extração

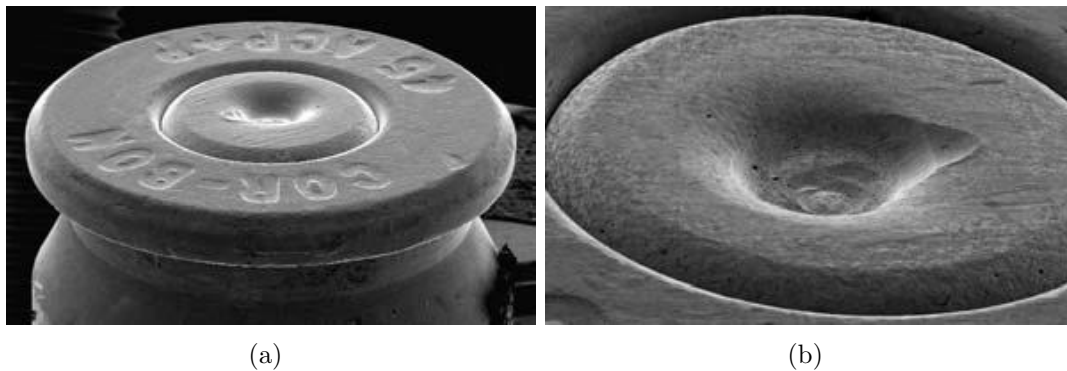


Fig. 4.2: Imagens resultantes da modalidade de aquisição de imagem de Microscopia Eletrônica de Varrimento. (a) Região da base do invólucro; (b) marca do percutor (região do primário) [65].

de informação topográfica da superfície de evidências balísticas [1]. Na Figura 4.2 são apresentadas imagens da região *head* de um invólucro, resultantes da modalidade de Microscopia Eletrônica de Varrimento.

4.1.3 Microscopia - Método Fotométrico

Devido à variedade de ligas da sua composição e conseqüente diversidade de propriedades, a superfície dos invólucros apresenta componentes de reflexão especular (reflexo espelhado da luz numa superfície, na qual a luz de uma única direção de entrada é refletida em uma única direção de saída) e de reflexão *backscatter* (reflexo da luz de volta para a direção de onde vieram) que influenciam o resultado de aquisição de imagem. De forma a minimizar estes artefactos, Sakarya et al. [66] desenvolveram uma geometria e tipo de iluminação otimizada. Para a construção da topografia 3D da região *head* de invólucros, foi utilizada na aquisição de imagem uma câmara CCD de 1024×1024 pixel, e um sistema de iluminação circular de 8 lâmpadas incandescentes. Desta forma, foram adquiridas 8 imagens da superfície do invólucro, e em cada aquisição, uma lâmpada diferente se ligava. Este método, permite que seja obtido um número suficiente de imagens para cada pixel, de tal forma que este não se encontre saturado nem completamente escuro. A escolha do ângulo de iluminação representa outro aspeto a ter em conta, uma vez que um ângulo demasiado baixo aumenta a reflexão especular, enquanto que um ângulo alto cria sombras na imagem. A superfície topográfica obtida através do método fotométrico é apresentado na Figura 4.3.

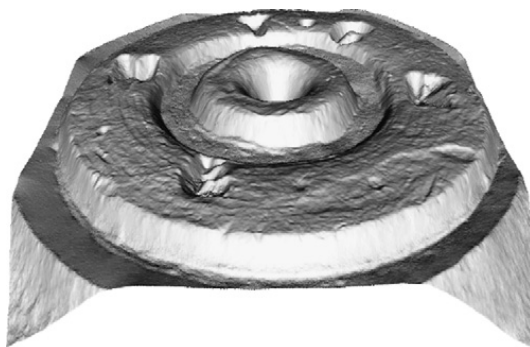


Fig. 4.3: Superfície topográfica obtida através do método fotométrico [66].

4.1.4 Varrimento LASER

A aplicação do LASER na área da balística forense apresenta-se como uma ferramenta útil, nomeadamente aquando da captação de imagens de evidências balísticas. A sua utilização recai, sobretudo, na construção tridimensional do perfil de invólucros e projéteis. Aquando da captação de imagem, o laser ajuda na focagem da lente do microscópio e na obtenção dos valores da profundidade, ao longo do eixo Z. Inicialmente, é projetado um feixe LASER na superfície da amostra, que é refletido e vai atravessar um cristal conoscópico, o qual produz um padrão de difração que é utilizado para determinação da profundidade Z da superfície em estudo [1]. O resultado deste método é um mapa da superfície altamente detalhado.

4.2 Microscopia de Comparação

A microscopia apresenta-se como uma ferramenta fundamental no estudo de evidências balísticas, na qual se encontra uma grande diversidade de instrumentos que, com base nas propriedades físicas da ótica, na iluminação e nas próprias evidências, permite a observação de evidências em diferentes níveis de complexidade. O conhecimento dos tipos de microscopia mais comuns e os seus fundamentos técnicos são muito importantes para os profissionais das ciências forenses, uma vez que permite não só compreender as imagens obtidas, mas também a sua utilidade e aplicação, dependendo da natureza das provas. O microscópio é utilizado por peritos forenses para localizar, isolar, identificar e comparar amostras recolhidas numa cena de crime, tais como, evidências balísticas. O estudo destas evidências com recurso à microscopia, traduz-se num excelente auxiliar na procura de armas de fogo envolvidas numa cena de crime.

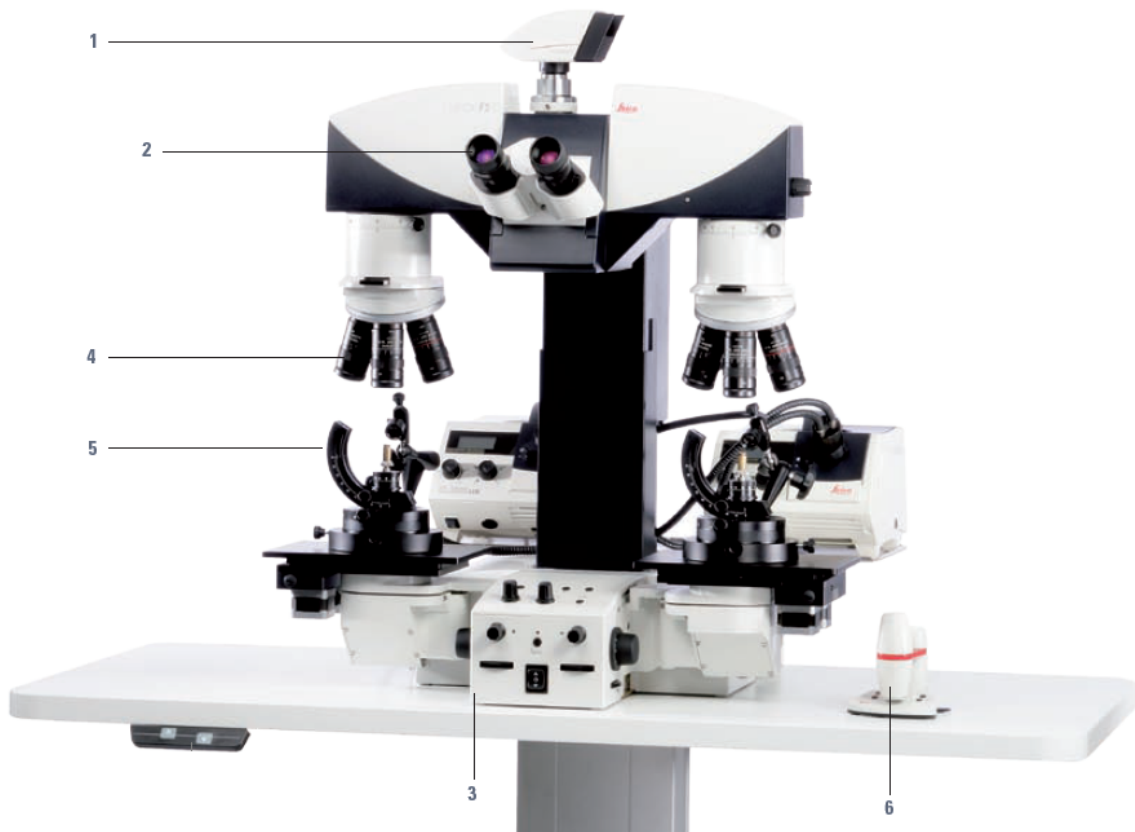


Fig. 4.4: Microscópio óptico de Comparação, da marca *Leica Microsystems* e modelo FS-C; (1) Camera digital a cores (*Leica DFC 295*); (2) Ocular; (3) Consola de controlo de focagem e movimentos da plataforma de suporte; (4) Objetivas; (5) Mecanismo de suporte de evidências; (6) Controlo remoto para movimentos da plataforma de suporte.

4.2.1 Microscópio Ótico

No âmbito do presente trabalho, foi utilizado para a aquisição de imagem de evidências balísticas um microscópio óptico de comparação, da marca *Leica Microsystems*, modelo FS-C (Figura 4.4), desenhado especificamente para investigação forense. Em balística, este instrumento é utilizado para analisar evidências lado a lado, colocadas em cada uma das plataformas de suporte. Estes microscópios são constituídos por dois microscópios ligados por uma ponte ótica, na qual resulta uma janela de exibição dividida, que permite que duas evidências sejam visualizadas simultaneamente. Este fator, constitui uma vantagem em relação ao microscópio convencional, onde o estudo da evidência é realizado individualmente. Entre os constituintes do microscópio óptico de comparação utilizado, destaca-se a câmara digital a cores (*Leica DFC 295*), a qual permite a aquisição de imagens, utilizadas na fase posterior de proces-

samento. A câmara possui uma resolução standard de 2047×1532 pixels (3 MP), e uma velocidade de captação de imagem de 25 frames por segundo, facilitando a configuração e localização da evidência no centro da imagem, através do monitor.

4.2.2 Software LAS

Esta secção tem como objetivo, descrever o fluxo de trabalho do software *Leica Application Suite* (LAS), e as suas capacidades básicas. O fluxo de trabalho descreve a ordem das tarefas necessárias para a documentação e análise das imagens adquiridas, no entanto, a versatilidade é mantida, pelo facto de que a operação do software não é restrita a etapas fixas. Assim, a barra de fluxo de trabalho é constituída por 5 separadores [67]:

1. *Setup*
2. *Acquire*
3. *Browse*
4. *Process*
5. *Analysis*

Separador *Setup*

Este separador (Figura 4.5) é utilizado para definir especificações dos componentes do microscópio conectados ao software LAS e, quando utilizado o modulo *Archive*, é possível criar um arquivo para capturar imagens e outros ficheiros. Entre as principais funcionalidades deste separador, destaca-se a funcionalidade que permite definir o tamanho de passo de focagem para cada lente do microscópio. Esta funcionalidade constitui grande importância no que diz respeito à modalidade de aquisição de imagem *Multifocus*, uma vez que o varrimento da superfície das evidências esta dependente do tamanho do passo. Cada um dos componentes do separador *Setup* é exibido no painel *Components*, e clicando no icon que se pretende seleccionar, surge uma nova janela que permite proceder às configurações pretendidas. Os icons exibidos neste painel dependem do modelo do microscópio que se encontra sincronizado com o software, assim como dos restantes equipamentos acessórios. Geralmente, todas as opções de configuração são listadas em base de dados, e é apenas necessário um duplo clique para se aceder a essas opções.

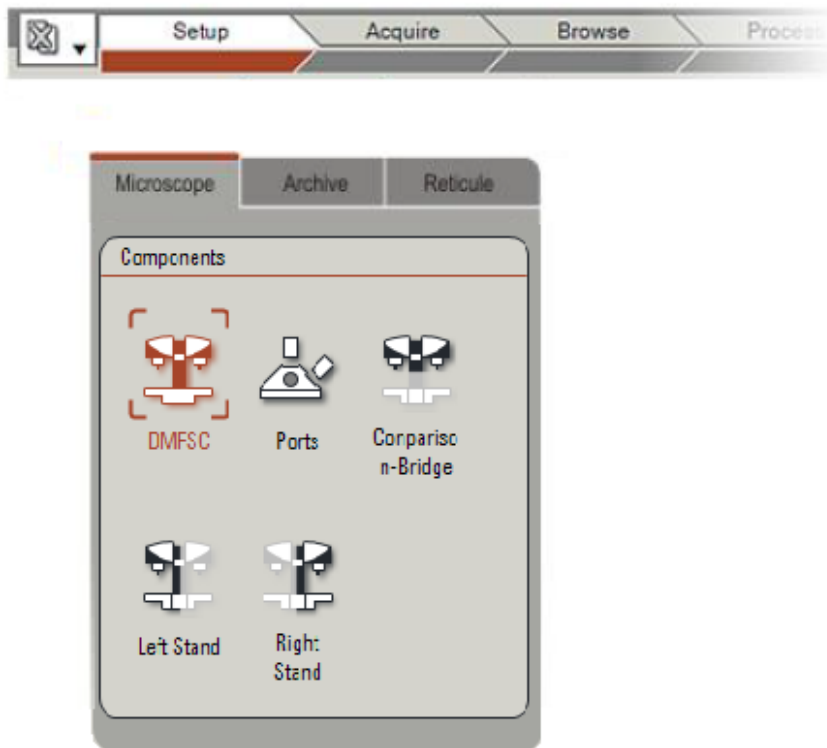


Fig. 4.5: Separador Setup do *software* LAS.

Separador *Acquire*

O separador *Acquire* permite o controlo do microscópio e câmara sincronizadas ao software, com a finalidade de adquirir imagens. O controlo destes componentes do sistema de aquisição de imagem inclui a definição da ampliação da objetiva, controlo do contraste de imagem, exposição e ganho. Outras opções como medidas, sobreposição de imagem e análise de imagem, constituem opções de aquisição mais especializadas. Na Figura 4.6 é apresentada uma representação gráfica da interface do software LAS relativa ao separador *Acquire*, com respetiva legenda dos principais componentes.

Separador *Browse*

O separador *Browse* é utilizado para gerir a estrutura de pastas associadas ao software LAS. Permite, entre outras funcionalidades, criar novas diretorias de armazenamento de imagem, defini-las como local de captura, e também aceder a imagens e respetivos dados relevantes, como por exemplo, a data de aquisição, o espaço ocupado em disco e especificações de calibração. As funcionalidades principais deste

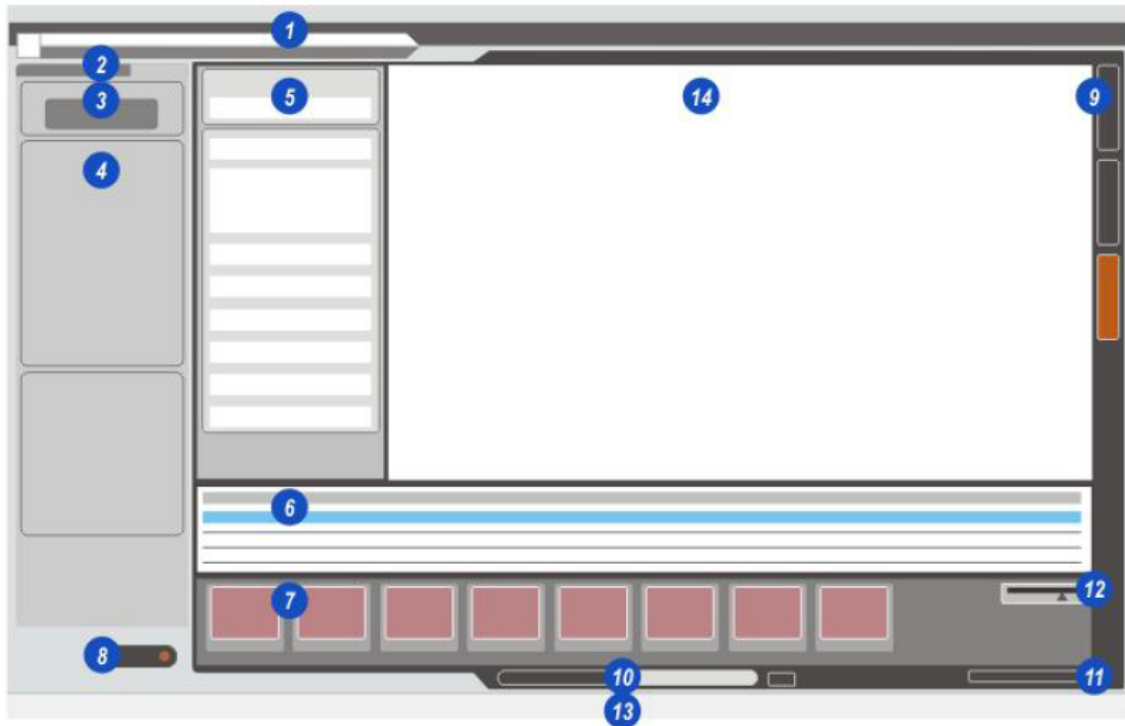


Fig. 4.6: Separador Acquire do *software* LAS: (1) barra de fluxo de trabalho; (2) Separadores: Selecionar microscópio, câmera ou Z; (3) Barra de ferramentas; (4) Painel de controlo; (5) Dados da Imagem: exibe e permite editar os dados relacionados com a imagem atual; (6) Grelha de imagem: exibe todas os dados das imagens, presentes numa pasta selecionada; (7) Galeria: exibe todas as imagens presentes na pasta selecionada; (8) Botão de aquisição de imagem: captura imagem a partir da câmera do microscópio; (9) Barra de ferramentas lateral: permite, entre outros, dimensionar, imprimir e apagar uma imagem ; (10) Controlos de pesquisa; (11) Galeria de navegação; (12) Ajuste do tamanho de imagem na galeria; (13) Barra de estado; (14) Visualizador de imagem.

separador incluem:

1. Navegação rápida entre pastas;
2. Criar novas pastas, sem a necessidade de fechar o software LAS;
3. Definir pastas como local de captura e de imediato proceder à aquisição de imagem;
4. Definir automaticamente o nome das imagens, com incremento automático da numeração das imagens posteriormente adquiridas;
5. Comentar e inserir observações, relativas às imagens obtidas;
6. Dimensionar a galeria para exibir todas as imagens presentes numa pasta e, seleccionar e exibir apenas uma imagem;
7. Ampla gama de ferramentas para rápido armazenamento e acesso de imagem.

Separador *Process*

O separador *Process* (Figura 4.7) possui funcionalidades de anotação e realce de características, que permitem adicionar detalhes à imagem, de forma a esta transmitir maior informação. As anotações podem ser guardadas com a imagem, e ser editadas em qualquer altura. As anotações básicas caracterizam-se essencialmente pelas funcionalidades de adicionar apontadores, etiquetas e legendas às imagens, enquanto que a funcionalidade de realce inclui ferramentas de ajuste de brilho, saturação e contraste, assim como de rotação e corte de imagem. As imagens digitais, são normalmente anotadas com apontadores gráficos e de texto, para fornecer informação extra ou indicar características de interesse. Na maior parte das vezes, surge como apontador gráfico e colorido, sobreposto à região de interesse da imagem original. Por fim, as anotações são gravadas como um ficheiro, em conjunto com a imagem, que quando é exibida, surge sem anotações. No entanto, se a anotação for fundida com a imagem, produz uma imagem única e integrada, que pode ser exportada para outras aplicações com as anotações intactas. Em situações onde as dimensões da imagem são superiores às da janela de exibição, é possível deslocar a imagem, e as anotações irão manter a sua posição. O mesmo acontece quando a imagem é ampliada ou reduzida. As anotações são dimensionadas em conformidade, apresentando um limite de legibilidade de tamanho.

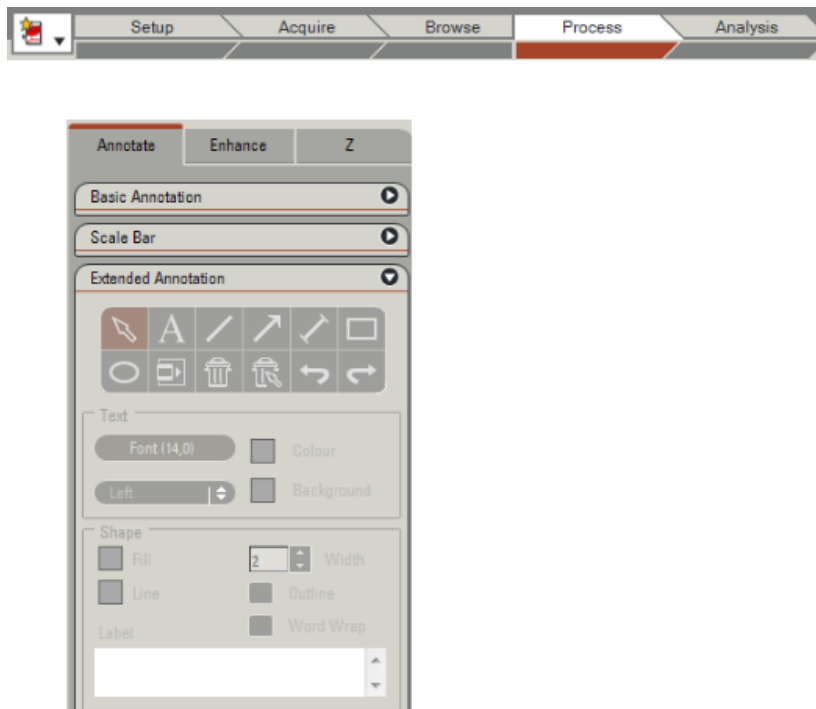


Fig. 4.7: Separador Process do *software* LAS.

Separador *Analysis*

O separador *Analysis* é utilizado para realizar medições nas imagens previamente adquiridas, e possui dois modos de análise: interativa e automática. No que diz respeito ao modo interativo, ou manual, o utilizador tem à sua disposição um conjunto de ferramentas que permitem a medição de distâncias entre dois pontos selecionados, a medição de ângulos e a determinação do diâmetro de uma determinada região através da sobreposição de um círculo ajustável a esta. O modo automático, por sua vez, inclui uma série de etapas que se inicia na seleção da imagem que se pretende estudar e termina com a criação de um relatório com todos os resultados obtido. Os passos intermédios incluem pré-processamento da imagem, ajuste do valor de *threshold*, binarização da imagem, medições na imagem binarizada, seleção dos resultados e a criação de histogramas.

4.3 Parâmetros de Aquisição de Imagem

A aquisição de imagens de evidências balísticas encontradas em cenas de crime revela-se um procedimento muito útil, uma vez que permite a sua documentação

e processamento para posterior comparação e correlação com evidências presentes numa base de dados. Existe um conjunto de fatores que influenciam, não só a qualidade das imagens obtidas, mas também o estudo de regiões específicas das evidências, nomeadamente a ampliação, a modalidade de aquisição e a iluminação utilizadas. É importante que os referidos parâmetros sejam reproduzíveis e constantes ao longo do tempo, de modo a não comprometer o processo de comparação das evidências. De forma a garantir a reprodutibilidade das imagens obtidas, definiu-se neste trabalho um protocolo de aquisição de imagem com recurso à realização de testes que permitiram otimizar todo o processo. Este protocolo será abordado de forma pormenorizada na secção 4.4.

4.3.1 Ampliação

A ampliação é definida como o número de vezes que a imagem é aumentada em relação ao objeto real. A ampliação *útil*, por sua vez, traduz-se na ampliação necessária para que a imagem ou objeto se torne visível, ou seja, para que atinja dimensões iguais ou superiores ao limite de resolução do olho humano. Neste trabalho, definiu-se que a ampliação máxima a utilizar, deverá conter a totalidade do objeto que se pretende estudar ou região de interesse.

A ampliação do microscópio na ocular (lente próxima da visão do utilizador), é o produto entre a ampliação definida na objetiva (lente próxima da evidência que se pretende estudar) e um fator multiplicativo de $1\times$ ou $1,5\times$. Quanto maior for a ampliação, maior é o detalhe da imagem adquirida e, conseqüentemente, menor o espaçamento do pixel. Os níveis de ampliação, respetivos parâmetros que o definem e espaçamento de pixel para cada um deles, são apresentados na Tabela 4.1.

4.3.2 Iluminação

No processo de aquisição de imagem, a iluminação assume-se como um fator crucial, uma vez que influencia a qualidade e reprodutibilidade das imagens. No processo de formação da imagem, existem três fatores que determinam os níveis de intensidade de pixel, de uma evidência: a orientação e perfil da superfície, o padrão de luz incidente e as propriedades óticas da superfície [68]. O contraste de uma imagem e, assim, a razão sinal-ruído, dependem fortemente da direção da iluminação. No caso de texturas com sulcos, como é o caso das imagens de invólucros e projéteis, uma variação no ângulo da iluminação condiciona o padrão dos níveis de cinzento da imagem. No que respeita às imagens de evidências, as imagens das estrias e

Tab. 4.1: Imagens de Microscopia: níveis de ampliação.

Nível	Objetivas	Fator Multiplicativo	Ampliação total		Espaçamento do Pixel (μm)
			Topo	Ocular	
1	0.4×	1×	0.22×	4×	14.5
2	0.4×	1.5×	0.33×	6×	9.70
3	1×	1×	0.55×	10×	5.82
4	1×	1.5×	0.83×	15×	3.88
5	2×	1×	1.10×	20×	2.91
6	2×	1.5×	1.65×	30×	1.94
7	4×	1×	2.20×	40×	1.45
8	4×	1.5×	3.30×	60×	0.97

das marcas impressas nas suas superfícies, sofrem grandes alterações dependendo da direção da incidência da luz e do tipo de fonte luminosa, podendo mesmo ser impossível a sua visualização. Esta dependência da iluminação torna a comparação automatizada de evidências usando dados de imagem bidimensionais (2D) muito difícil [66]. Estas imagens apenas apresentam contraste máximo se a iluminação incidir perpendicularmente. Deste modo, apenas o valor do ângulo necessita de ser variado [68].

A seleção da direção ótima da iluminação é dependente da textura, o que implica que diferentes áreas de superfícies tenham de ser iluminadas de diferentes direções, o que na prática constitui uma difícil abordagem [68]. Para contornar o problema, podem ser realizadas topografias tridimensionais das superfícies, as quais são independentes da iluminação e contêm a informação acerca das marcas, desde que tenha resolução espacial suficiente [66]. Outra solução foi proposta por León [68], que sugere a utilização de um algoritmo de fusão de imagem, de modo a obter imagens de melhor qualidade utilizando imagens iluminadas de diferentes direções. Para a obtenção da série de imagens, León desenvolveu sistema automatizado que consiste num módulo de iluminação flexível e num microscópio comercial. O sistema de iluminação é composto por uma plataforma com 256 LEDs e um refletor parabólico no foco onde o objeto é fixado. A localização de um LED na plataforma determina a direção da qual a superfície do objeto é iluminada. A variação destes parâmetros permite a aquisição de qualquer área da superfície do objeto com o máximo contraste. Uma abertura no refletor permite a aquisição da imagem com um microscópio

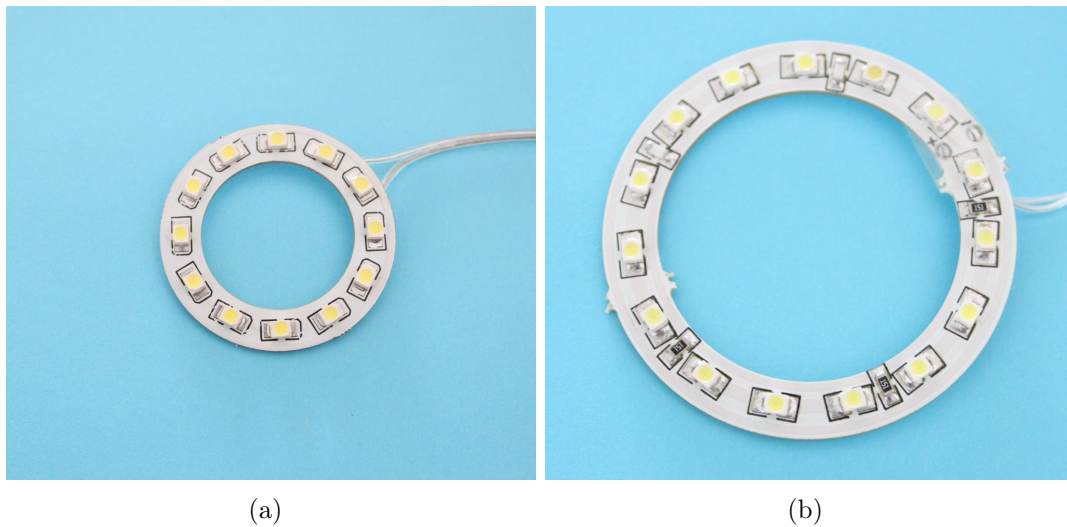


Fig. 4.8: Iluminação LED adotada para aquisição de imagem; (a) Anel LED, diâmetro = 4mm; (b) Anel LED, diâmetro = 6mm.

e uma câmara CCD.

4.3.3 Modalidades de Aquisição de Imagem

De forma a obter a máxima informação das evidências balísticas consideradas para este projeto, foram definidas quatro modalidades de aquisição:

- *Planar*;
- *Multifocus*;
- *Microscan*;
- *Multiscan*.

A modalidade ***Planar*** permite a aquisição de uma imagem bidimensional da região da base do invólucro e da região da base do projétil. A obtenção da imagem relativa ao invólucro, permite determinar, entre outros parâmetros, o valor do diâmetro da região da base, o qual possibilita, por sua vez, a determinação do calibre da munição utilizada no disparo.

Com a modalidade ***Multifocus*** é possível obter uma imagem tridimensional da superfície da evidência, ou região da mesma, em estudo. Esta imagem tridimensional é obtida através da conjugação de duas imagens bidimensionais: *montage* (textura) e *depthMap* (mapa de profundidade). A primeira traduz-se numa série de imagens

Tab. 4.2: Estudos realizados para diferentes regiões de interesse.

Modalidade	Ampliação	Evidência	Região de Interesse
Planar	4×	Invólucro	<i>head</i>
	6×	Projétil	<i>base</i>
	10×		
	15×		
	20×		
	30×		
	40×		
Multifocus	6×	Invólucro	<i>head</i>
	10×	Projétil	<i>base</i>
	20×		<i>apex</i>
Microscan/ Multiscan	4×	Projétil	<i>bearing</i>
	6×		<i>evidence</i>
	15×		
	20×		

focadas em diferentes posições da evidência, ao longo do eixo Z, que se fundem de forma a criar uma imagem composta de grande qualidade e resolução [69]. O mapa de profundidade, por sua vez, trata-se de uma imagem à qual foi atribuído aos pixels de um determinado nível de *Z-position*, um valor entre 0 e 1. Considera-se que pixels com valor próximos de 0 representam valores de profundidade superiores, enquanto que valores de pixels próximos de 1 representam valores de profundidade mais inferiores. Esta imagem fornece informação acerca do relevo, enquanto que a primeira dá informação acerca da textura.

Na modalidade **Microscan**, a aquisição das imagens planares (2D) da evidência é realizada de modo intercalado com a sua rotação (de 30° em 30°), permitindo a visualização de 360° do projétil.

Por fim, a modalidade **Multiscan** consiste na combinação das duas últimas modalidades referidas. É em tudo semelhante à modalidade **Microscan**, contudo a aquisição de imagens ao invés de ser planar é multi-focada. Na Tabela 4.2 são apresentados os estudos, realizados neste trabalho, considerando diferentes regiões das evidências, com recurso a diversas ampliações, para cada uma das modalidades de aquisição anteriormente referidas.

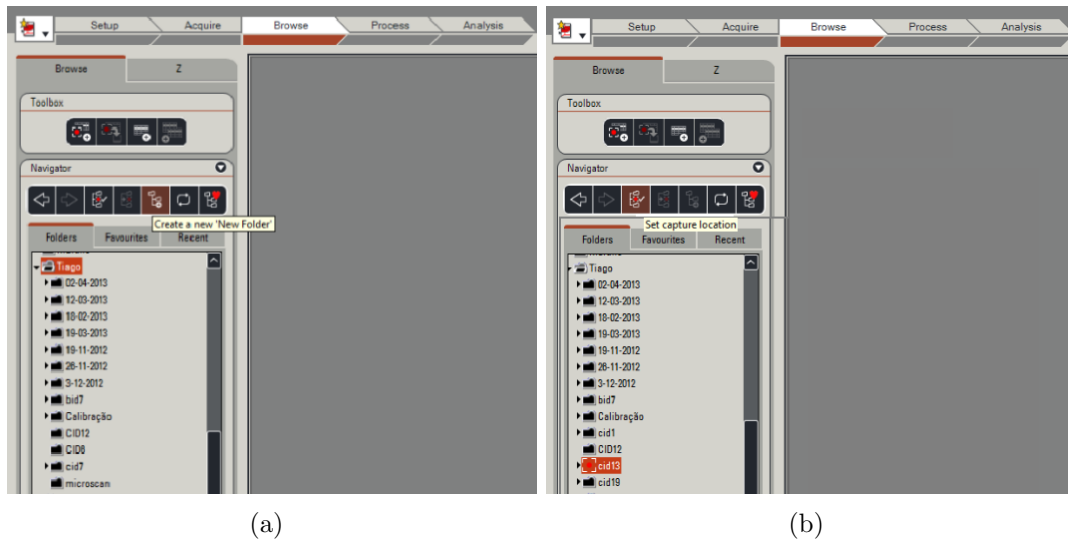


Fig. 4.9: Separador *Browse* do software LAS. (a) Botão para criar pasta de utilizador, (b) Botão para definir local de captura de imagem.

4.4 Protocolos de Aquisição

O procedimento para aquisição de imagem inicia-se com a abertura do programa (LAS 4.0) recorrendo ao atalho existente para o efeito, no ambiente de trabalho. É importante referir que o microscópio deve ser previamente ligado, para assegurar o funcionamento do software. Após o arranque deste, o utilizador deverá começar por criar uma pasta pessoal, e para tal, deverá seleccionar o separador *Browse* no menu principal, o separador *Folders* do menu *Navigator* e de seguida *Create a new "New folder"*, como apresentado na Figura 4.9(a). No interior da pasta de utilizador, este deverá definir uma estrutura de pastas, com a indicação do tipo de evidência que se pretende estudar, o id da mesma, a região da evidência em estudo, a modalidade de aquisição e a ampliação. Com esta estrutura, garante-se que os ficheiros gerados a partir de qualquer serviço sejam armazenadas de forma conveniente. Depois da criação das pastas, o utilizador deverá seleccionar a pasta onde pretende gravar os ficheiros de saída da aquisição, e de seguida seleccionar *Set Capture Location*, como apresentado na Figura 4.9(b). Este passo deverá ser repetido, sempre que a evidência em estudo seja substituída. Desta forma, todas as imagens adquiridas e os respetivos ficheiros xml serão gravados na pasta correta.

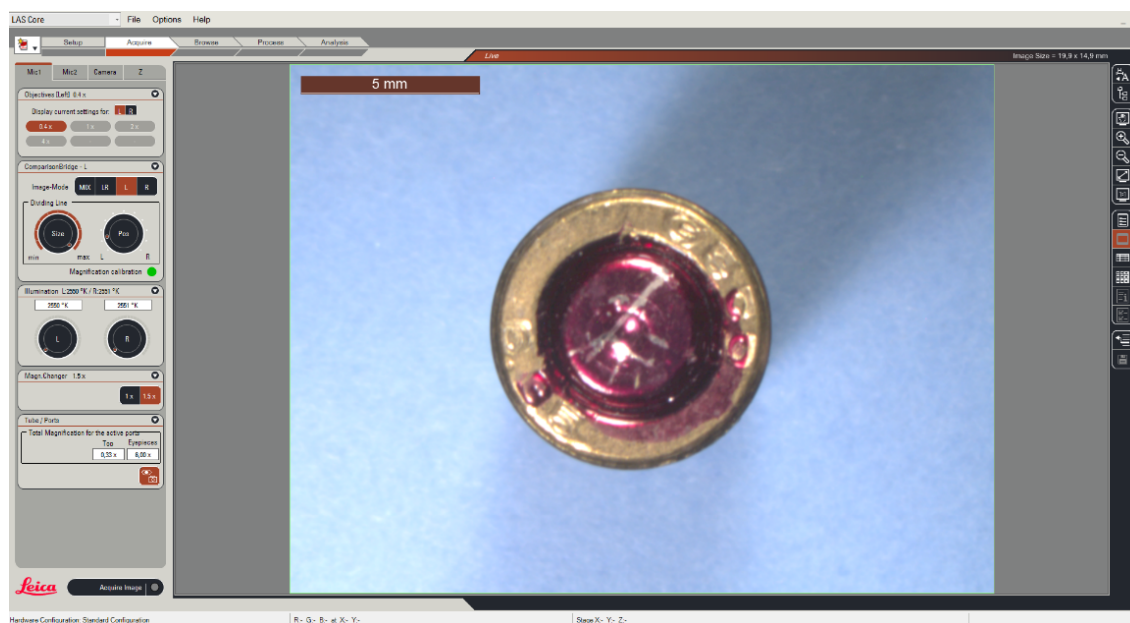


Fig. 4.10: Separador *Acquire* com exibição da superfície da região *head* de um invólucro, pronta para ser adquirida.

4.4.1 Modalidades *Planar* e *Microscan*

Logo que a diretoria esteja criada, segue-se a aquisição de imagem propriamente dita. Para a aquisição de imagens com recurso à modalidade planar, o utilizador começa por seleccionar o separador *Acquire*, e de seguida, selecciona o separador *Mic1* (Figura 4.10). A modalidade planar, é utilizada para o estudo de invólucros (região: *head*) e de projéteis (região: *base*). Assim, a evidência começa por ser colocada no suporte do microscópio de comparação, conforme apresentado na Figura 4.11, e o utilizador selecciona a objetiva e o fator multiplicativo pretendido (1x ou 1.5x) que pretende utilizar. A combinação destes 2 parâmetros, define a ampliação pretendida, como é apresentado na Tabela 4.1. Para todas as modalidades, deverá ser escolhida a máxima ampliação que permita a visualização completa da região que se pretende estudar. De seguida, a evidência é centrada e focada, com recurso à consola de controlo, e para verificar que a evidência se encontra devidamente centrada e focada, recorre-se à ocular do microscópio (ver Figura 4.4).

De forma a aumentar o contraste entre a evidência e a plataforma de suporte, utilizou-se um fundo de cor azul. Foram realizados vários testes com diferentes cores, no entanto, a cor azul é a que melhor contrasta com a cor das evidências. A utilização do fundo é de extrema importância, visto que sem a sua existência, a



Fig. 4.11: Suporte para invólucros e projéteis, utilizado na modalidade de aquisição de imagem Planar; (a) projétil (região: *base*); (b) invólucro (região: *head*)

região de interesse que se pretende estudar não iria contrastar com a plataforma de suporte, dificultando a posterior aplicação de algoritmos de segmentação. Por fim, quando todas as condições estiverem reunidas, seleciona-se o botão *Acquire Image* no canto inferior direito da janela (Figura 4.10).

No que respeita à modalidade *Microscan*, o processo de aquisição de imagem é semelhante ao da modalidade Planar, no entanto existem determinadas particularidades que devem ser consideradas. Com esta modalidade, pretende-se estudar a região *bearing* e *evidence* do projétil, e para tal, a evidência deverá ser colocada no suporte da plataforma como apresentado na Figura 4.13. Dada a forma “cilíndrica” das regiões da evidência a estudar, esta obriga à utilização de um suporte rotativo, e a aquisição de imagem é realizada de forma intercalada com a rotação do projétil, no mesmo sentido de rotação do projétil no cano da arma. De forma a permitir a visualização de uma região em mais que uma vista, definiu-se um ângulo de rotação de 30° , que corresponde a 5 unidades no suporte rotativo do microscópio. No final, deverão existir 12 imagens (Figura 4.14) e os respetivos ficheiros xml.

4.4.2 Modalidades *Multifocus* e *Multiscan*

Para a aquisição de imagem na modalidade *Multifocus*, o utilizador deverá selecionar o separador *Acquire*, e de seguida o separador *Z*. Esta modalidade é utilizada no estudo da região da base e do *apex* do projétil, e no estudo da região da base do invólucro. Inicialmente a evidência é colocada no suporte da plataforma do

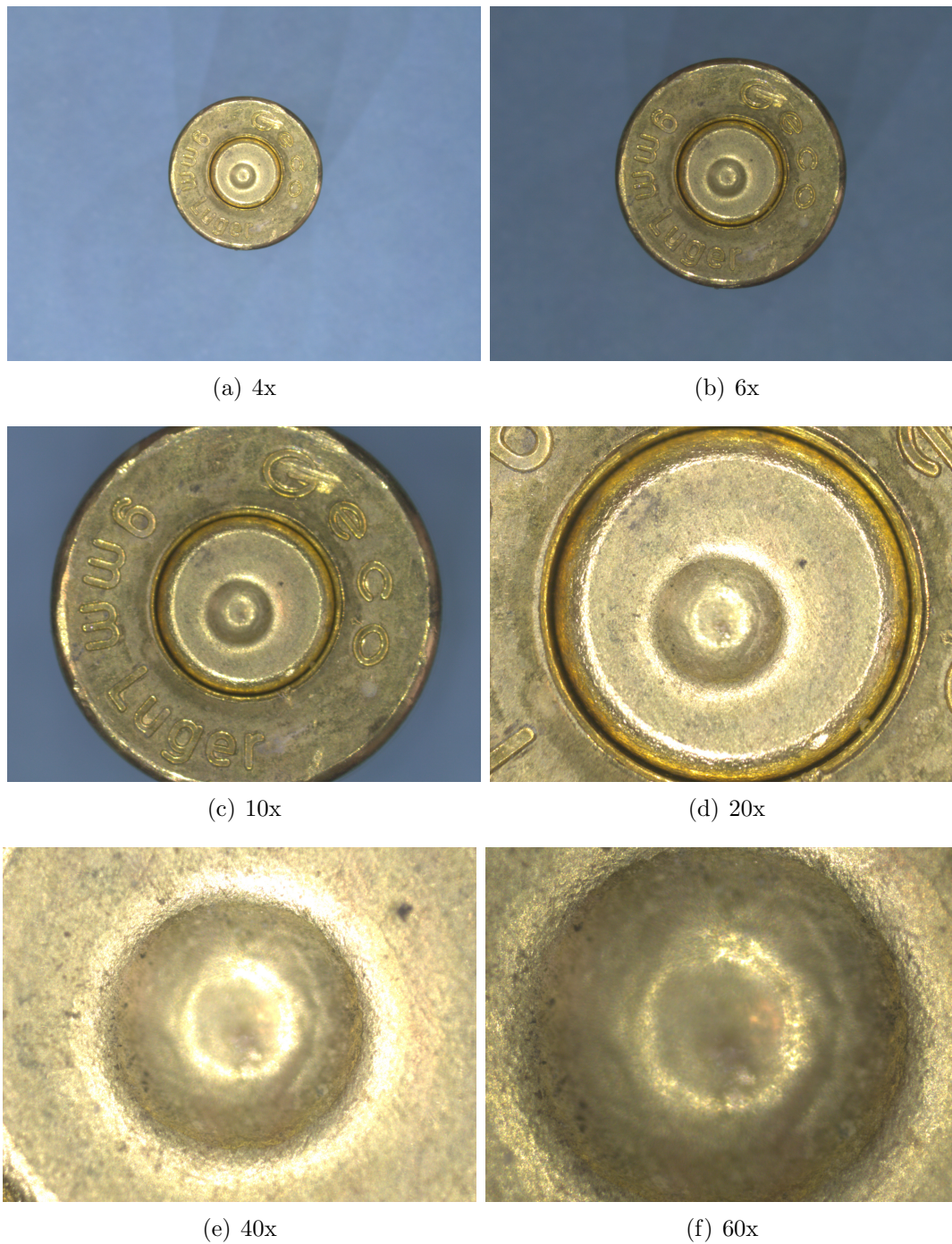


Fig. 4.12: Resultados da modalidade planar para vários níveis de ampliação (CID=12).

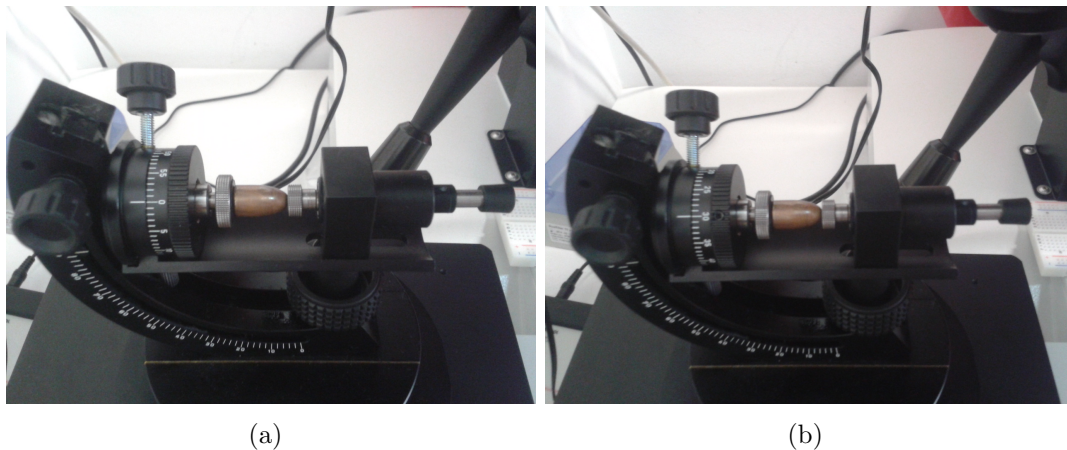


Fig. 4.13: Suporte para projéteis, utilizado nas modalidades de aquisição de imagem Microscan e Multiscan; (a) Evidência colocada no suporte com ângulo de rotação = 0° ; (b) Evidência colocada no suporte com ângulo de rotação = 180° .

microscópio (Figura 4.15), sobre o fundo azul, e de seguida, é centrada na imagem e focada. Para esta modalidade, a evidência deverá ser focada no plano de referência *Z-position*, que se definiu como sendo o plano intermédio de profundidade da região que se pretende estudar. Após a focagem, o utilizador deverá fazer *reset* às posições *Start* e *End*, como apresentado na Figura 4.16(a), e verificar que $Start = End = Z-position$. De seguida, define a amplitude de varrimento, de tal forma que $Start = Z-position + 1000 \mu m$ e $End = Z-position - 1000 \mu m$. O utilizador deverá verificar que *Z-range* tem uma amplitude de $2000 \mu m$ (Figura 4.16(b)). O valor da amplitude foi escolhida de forma a garantir que ocorre varrimento de toda a superfície ao longo do eixo *z*. O varrimento, para uma ampliação de 20x, ocorre em passos de $55,56 \mu m$ (*Optimize step size*). Por fim, para a aquisição de imagem, o utilizador deverá seleccionar o botão *Acquire Multifocus* e aguardar pela saída das imagens 4.17. Durante a aquisição, é importante que não exista movimento da evidência nem variações na iluminação, o que poderia comprometer a qualidade das imagens.

Por fim, a modalidade *Multiscan*, constitui uma junção entre as modalidades *Microscan* e *Multifocus*. Esta modalidade é utilizada para o estudo de projéteis (região: *bearing* e *evidence*), e o processo de aquisição é semelhante ao da modalidade *Microscan*, no que respeita à alternância aquisição/rotação da evidência. No entanto, a aquisição de imagem é feita no modo de multi-focagem.

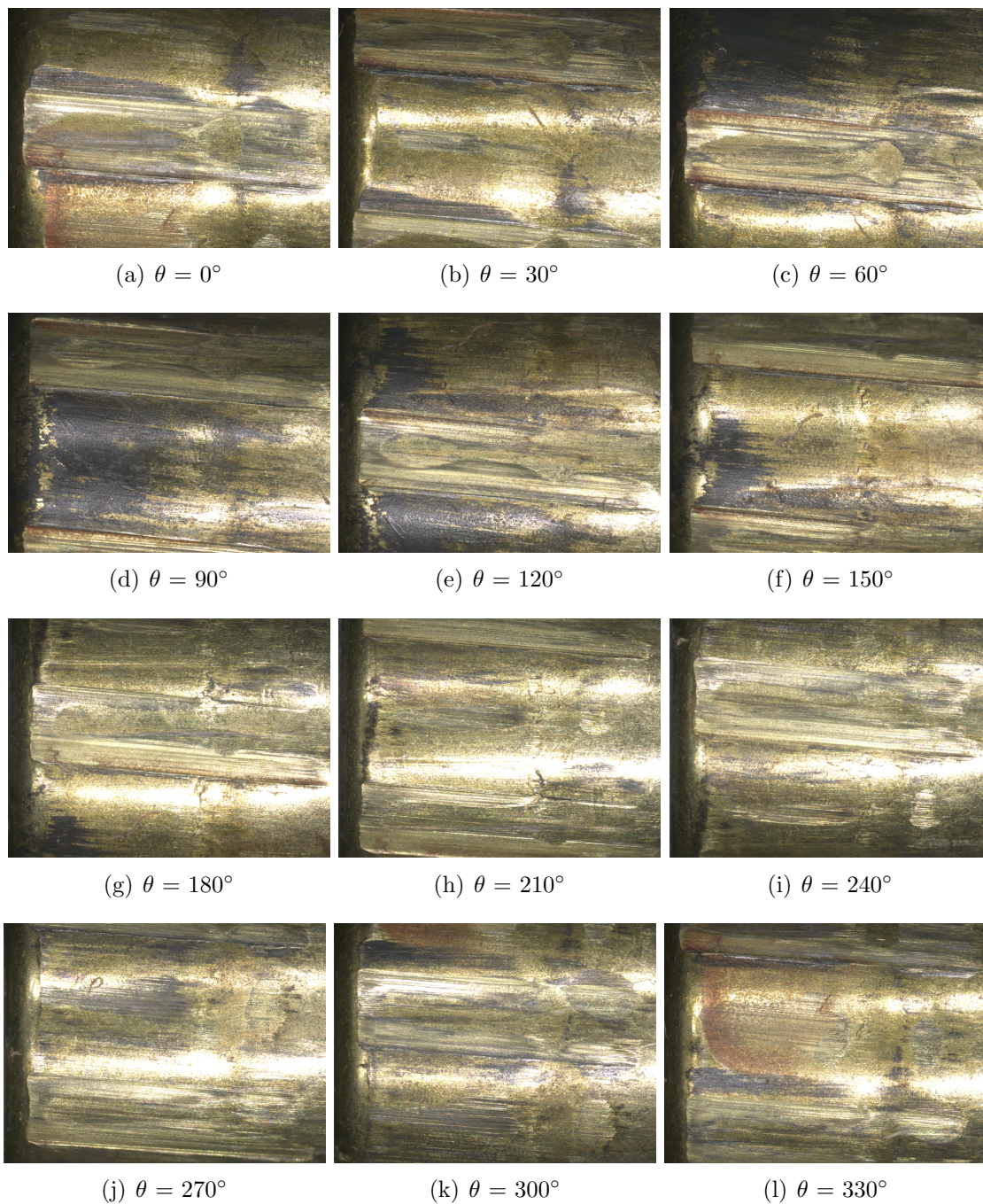


Fig. 4.14: Resultados da modalidade Microscan da região *bearing* de um projétil (ampliação = 20 \times) para diferentes valores angulares (θ) de rotação da evidência.

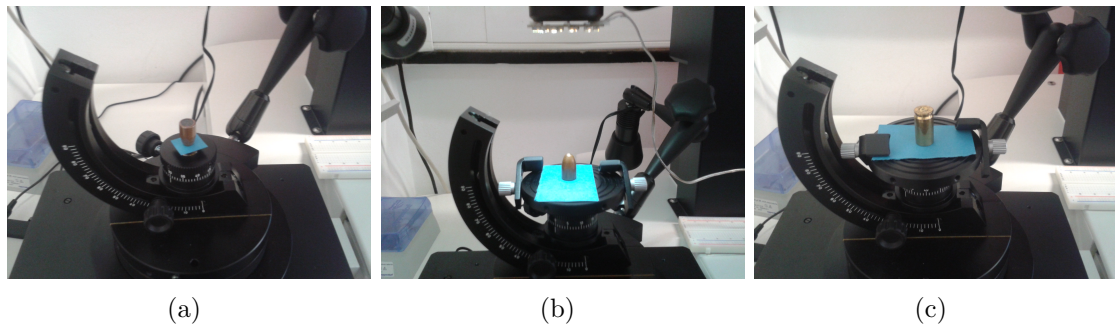


Fig. 4.15: Disposição das evidências no suporte da plataforma para aquisição de imagem a partir da modalidade *Multifocus*; (a) Projétil (região: base) ; (b) Projétil (região: *apex*) ; (c) Invólucro (região: *head*) .

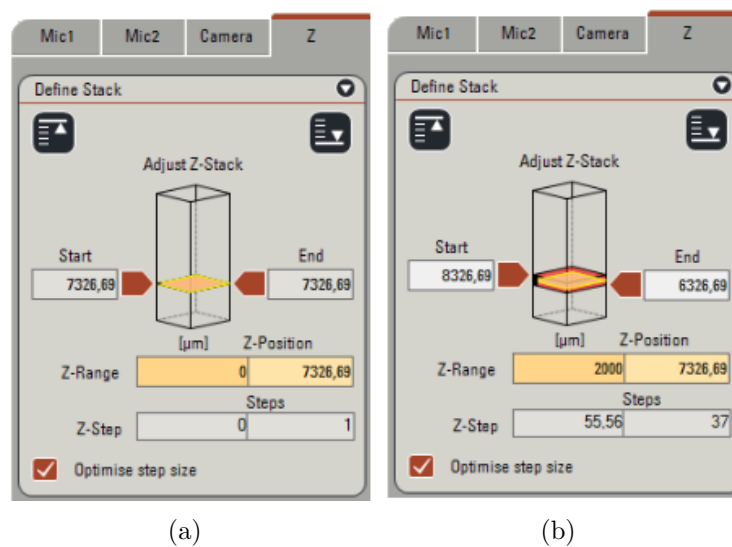


Fig. 4.16: Definição da amplitude de varrimento; (a) *Reset* das posições *Start* e *End*

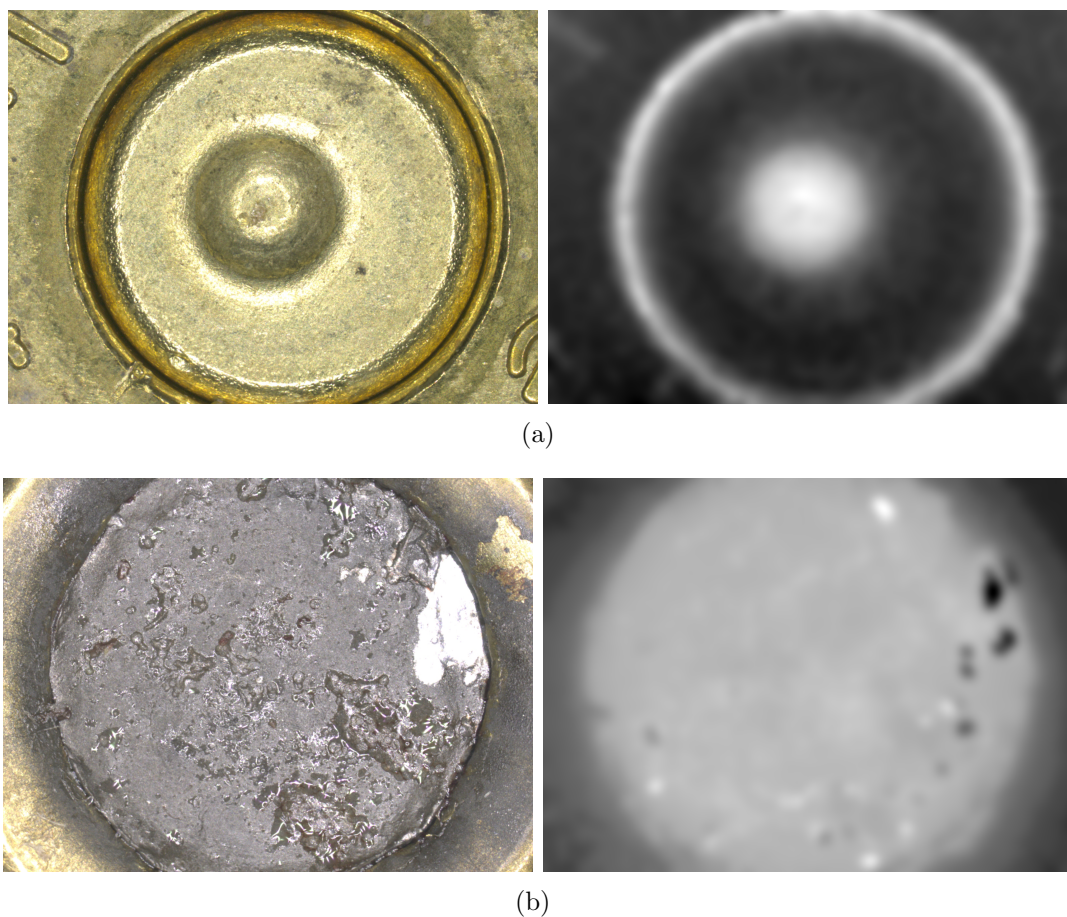


Fig. 4.17: Resultados da modalidade Multifocus (ampliação = 20 \times). As imagens da esquerda dizem respeito à textura (montage) e as imagens da direita ao mapa de profundidade (depthmap); (a) região *head* de um invólucro e (b) da região *core* de um projétil. Nas imagens do mapa de profundidade, as intensidades maiores caracterizam regiões da evidência mais profundas, enquanto que intensidades menores caracterizam regiões da evidência menos profundas.

4.4.3 Comparação Manual

O processo manual de comparação de um projétil ou invólucro com a arma que os deflagrou é um método constituído por múltiplas etapas [1]. Assumindo que existe uma concordância entre determinadas características das evidências, estas são colocadas nas plataformas de suporte do microscópio ótico de comparação, na tentativa de encontrar semelhanças entre elas. De forma a identificar as lacunas inerentes ao processo de comparação manual, foram colocadas nas plataformas de suporte, dois invólucros deflagrados pela mesma arma, procedendo-se à sua comparação. O primeiro passo consistiu no ajuste da posição das plataformas de suporte, de forma a que o círculo da região *head* de ambos os invólucros fosse coincidente. Este processo baseia-se num movimento de translação. Após este movimento, procedeu-se à rotação de uma das evidências, no sentido de estabelecer concordância entre a orientação do achado escolhido para estudo (marca do percutor).

Para além de demorada, esta abordagem revelou-se complexa no que respeita à necessidade de centrar as evidências para posterior rotação em torno de um eixo comum. Os resultados da comparação manual obtidos são apresentados na Figura 4.18, onde se verifica que, após rotação de uma das evidências, o círculo da região *head* de ambas as evidências deixa de coincidir. Com base nas dificuldades sentidas no processo de comparação manual, foi desenvolvido um algoritmo que permitem a comparação automática de invólucros com base no alinhamento de imagem, e um método semi-automático, para o mesmo efeito. Os referidos métodos são descritos no Capítulo 6.

4.5 Gestão de Dados

Tendo em conta as modalidades de aquisição definidas, os níveis de ampliação e as regiões de interesse passíveis de serem estudadas em cada uma das evidências, uma grande quantidade de dados pode ser gerada em cada estudo, resultante da combinação dos 3 parâmetros referidos. Desta forma, a gestão dos dados constitui grande importância, uma vez que estes deverão ser organizados de forma conveniente. Para além da sua organização, o tempo despendido para a documentação de uma evidência e o espaço ocupado para o seu armazenamento, são fatores que devem ser tidos em conta.

Em 1994, o escritório da Polícia Nacional de Controlo de Drogas dos EUA, realizou um estudo sobre a viabilidade de sistemas de imagem automatizados que

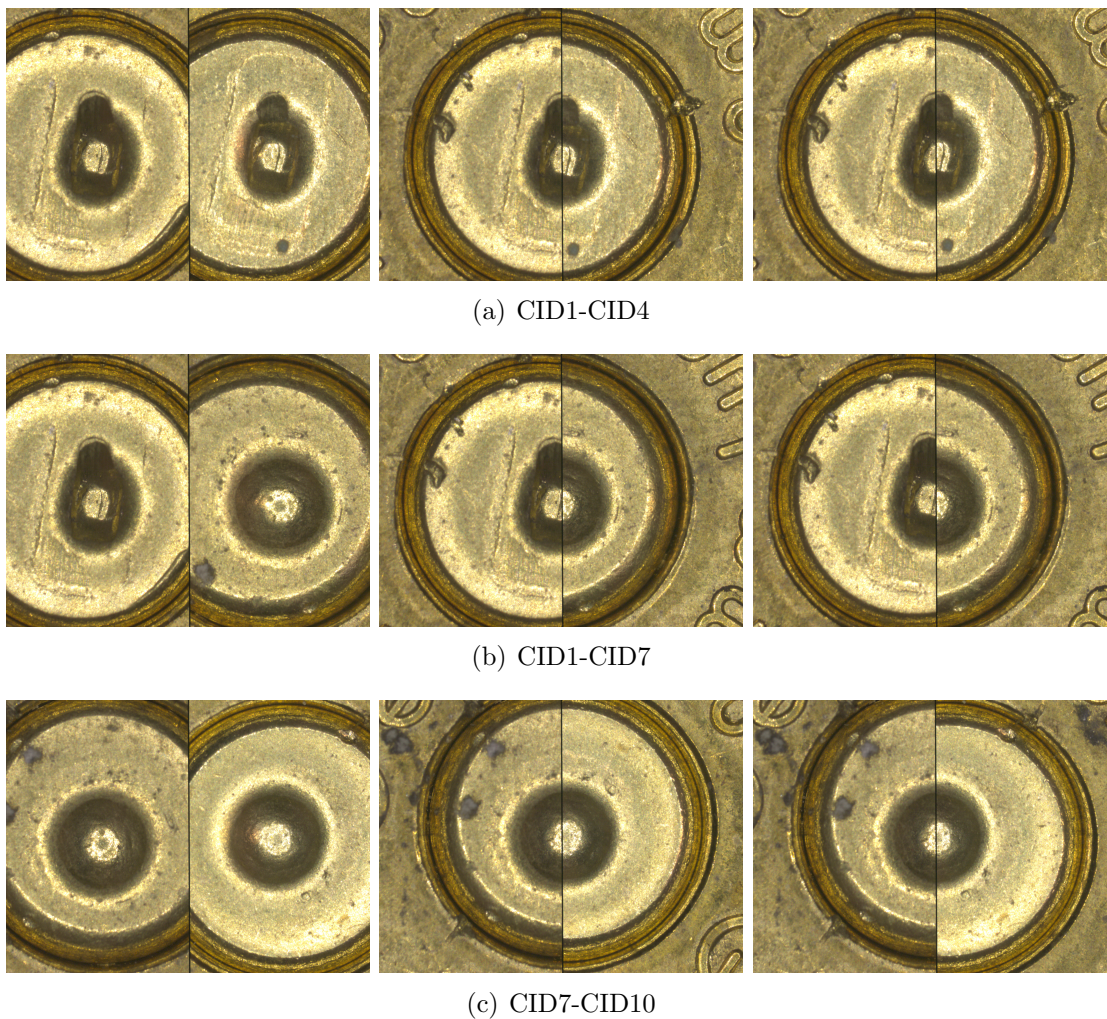


Fig. 4.18: Microscopia de Comparação: Comparação manual entre as (a) evidências 1 e 4; (b) evidências 1 e 7 (c) evidências 7 e 10. As imagens apresentadas à esquerda permitem visualizar a marca do percutor em ambas as evidências, enquanto que as imagens do centro e da direita resultam de ajustes efetuados no sentido de detetar similaridade entre as evidências.

Tab. 4.3: Ficheiros obtidos em cada estudo das modalidades de aquisição de imagem, e respetivo espaço ocupado em disco.

	Modalidades			
	Planar (6 ×)	Multifocus (20 ×)	Microscan (6 ×)	Multiscan (20 ×)
Ficheiros	image.jpg image.xml	montage.jpg montage.xml depthmap.tif depthmap.xml confidencemap.tif confidencemap.xml montagemultifocus.xml	12× image.jpg 12× image.xml	12× montage.jpg 12× montage.xml 12× depthmap.tif 12× depthmap.xml 12× confidencemap.tif 12× confidencemap.xml 12× montagemultifocus.xml
Espaço em disco	565 Kb	14.2 Mb	8.62 Mb	170 Mb

poderiam reter informações e imagens de invólucros e projéteis deflagrados [70]. Este estudo mostrou que, no contexto das bases de dados utilizados pelas forças policiais, estes sistemas são viáveis e podem revolucionar o processo de identificação de armas de fogo, tornando-o automático.

Sempre que uma munição é deflagrada, esta vai originar duas novas evidências (invólucro e projétil), e devido ao contacto com a arma de fogo, essas evidências adquirem marcas únicas. Enquanto que os invólucros originados raramente são danificados e são recuperados na maioria das vezes em bom estado, os projéteis, quando recuperados, surgem geralmente deformados. A deformação do projétil torna por vezes a sua análise mais difícil, e em geral, a sua identificação é mais demorada. Para o estudo destas evidências balísticas, no âmbito do presente trabalho, foram desenvolvidas 4 modalidades de aquisição, tal como referido na secção 4.3.3. Na tabela 4.3 são apresentados os ficheiros obtidos em cada estudo das modalidades de aquisição, e o espaço ocupado em disco por cada estudo. Tendo em conta que em Portugal existem 1.400.000 armas de fogo registadas (dados da PSP), e que cada arma de fogo, num disparo, origina duas evidências (invólucro + projétil), seriam recolhidas 2.800.000 evidências. Considerando também que para este conjunto de evidências são adquiridas imagens de invólucros com recurso às modalidades *Planar* (6×) e *Multifocus* (20×) e imagens de projéteis com recurso às modalidades *Microscan* (6×) e *Multiscan* (20×), seria necessária uma base de dados com aproximadamente 257 TB (TeraByte) de espaço em disco. No entanto, este valor poderia ser drasticamente reduzido para 19,5 TB, se apenas fossem considerados os invólucros, que são recolhidos quase sempre em bom estado, ao contrário dos projéteis.

Processamento e Visualização de Imagem

Os algoritmos de processamento de imagem desenvolvidos no âmbito da presente dissertação, foram implementados em C++, uma linguagem de programação de alto nível orientada a objetos. A opção por esta linguagem de programação recaiu no facto de apresentar fácil integração com as demais ferramentas utilizadas, bom desempenho e reaproveitamento de código. Os algoritmos foram desenvolvidos em ambiente *Microsoft® Visual C++ 2010 Express Edition*, pelo facto de oferecer facilidades de codificação e por estar disponível gratuitamente. Adicionalmente, foi utilizado o *software CMake®* para auxiliar no processo de compilação e para gerar ficheiros de projeto do *Visual Studio*, utilizadas na compilação das bibliotecas ITK (*Insight Segmentation and Registration Toolkit*) e dos algoritmos de processamento de imagem.

5.1 ITK - *Insight Toolkit*

O ITK é uma ferramenta que possui uma extensa coleção de bibliotecas C++ para o processamento e representação de imagens médicas, e foi proposto por um consórcio (*Insight Consortium*) de empresas e universidades. As bibliotecas ITK são distribuídas gratuitamente pela *US National Library of Medicine*, e o seu *download* pode ser feito a partir da respetiva página web¹. Por se tratar de um projeto *open source*, os programadores de todo o mundo podem utilizar, manter e estender o *software* [71]. O ITK é composto por algoritmos e estruturas de representação de dados, e tem como principais aplicações:

- Segmentação de imagem;

¹ <http://www.itk.org/>

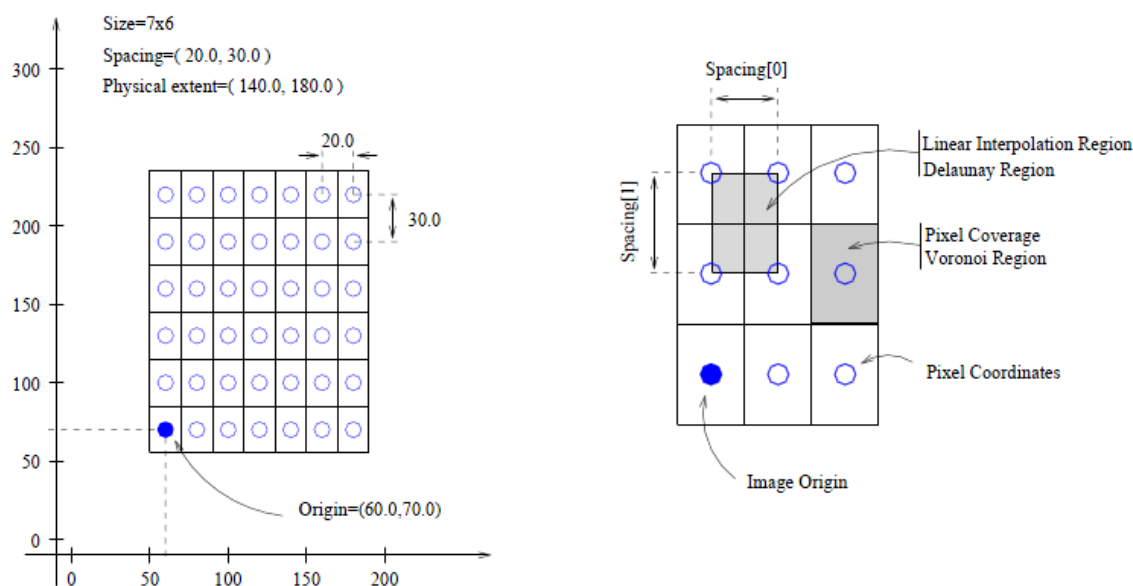


Fig. 5.1: Conceito geométrico associado à imagem digital [71].

- Alinhamento de imagem.

5.1.1 Segmentação de Imagem

Nos últimos anos, uma grande quantidade de métodos para segmentação de imagem (Figura 5.1) tem sido propostos e implementados. Contudo, apesar do forte investimento, não existe nenhuma abordagem que permita resolver todos os problemas de segmentação, devido à grande variedade de imagens existentes hoje em dia [71]. Os algoritmos de segmentação mais eficazes são obtidos através da combinação personalizada de componentes, que são ajustados em função das características da imagem de entrada, e da região a ser segmentada. Neste trabalho, optou-se por um algoritmo de segmentação com base no crescimento de região - o algoritmo *Connected Threshold*. Este algoritmo tem como princípio, o crescimento de região a partir de um ou mais pixels de semente que se considere que estejam no interior do objeto segmentado. Para o algoritmo desenvolvido, foram definidos 4 pixels de semente, para garantir o crescimento de região em redor do objeto que se pretende segmentar. Em imagens de invólucros (região *head*) de 9 mm, com ampliação de 10 \times , verifica-se que, caso fosse definido apenas um ponto de semente, a segmentação do objeto não iria ocorrer com sucesso, e como tal, foram definidos 4 pixels para iniciar o crescimento de região. Na Figura 5.3 são apresentados resultados da segmentação para

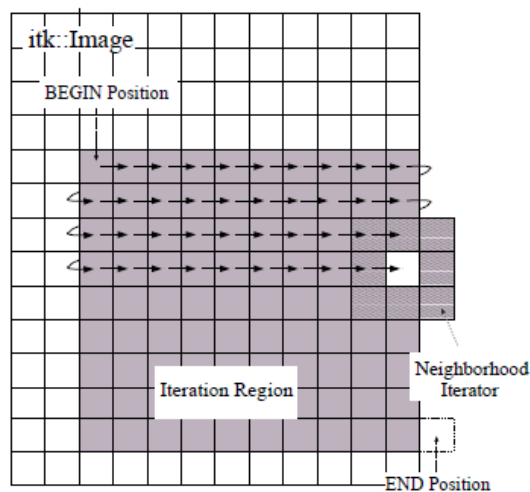


Fig. 5.2: Iterador de vizinhança aplicado a uma imagem 2D. A extensão da vizinhança é indicada pelo *hashing* em redor da posição de iteração. Os pixels que se encontrem dentro desta medida são acessíveis pelo iterador [71].

diferentes casos, onde se verifica que a escolha dos pixels de semente são extremamente importantes para obtenção do objeto segmentado. Os pixels na vizinhança do pixel de semente são avaliados, para determinar se devem ou não fazer parte do objeto, e, em caso afirmativo, eles são adicionados ao objeto, e o processo continua [71]. Os algoritmos de crescimento de região diferem uns dos outros, no que respeita ao critério utilizado para determinar se um pixel deve ou não ser incluído na região, o tipo de conectividade para escolher pixels da vizinhança e a estratégia utilizada para considerar pixels vizinhos. O filtro *Connected Threshold* utiliza como critério para incluir pixels numa região de crescimento, o valor da intensidade (I) de pixel dentro de um intervalo específico, de tal forma que:

$$I(X) \in [lower, upper] \quad (5.1)$$

Quanto ao tipo de conectividade para a escolha de pixel, este algoritmo utiliza um iterador de vizinhança (Figura 5.2). Um pixel de vizinhança é definido como um conjunto de pixels que são adjacentes em relação a outro pixel numa imagem. O tamanho e a forma da vizinhança, bem como a conectividade entre pixels pode variar com a aplicação. Um iterador de vizinhança corre uma região da imagem tal como os restantes iteradores, contudo, em vez de iterar um único pixel em cada passo, itera ao mesmo tempo os pixels de toda a vizinhança. O centro do pixel de vizinhança posiciona-se sempre sobre o índice atual, e todos os outros índices de pixels vizinhos são referenciados como deslocções do índice central. No que diz

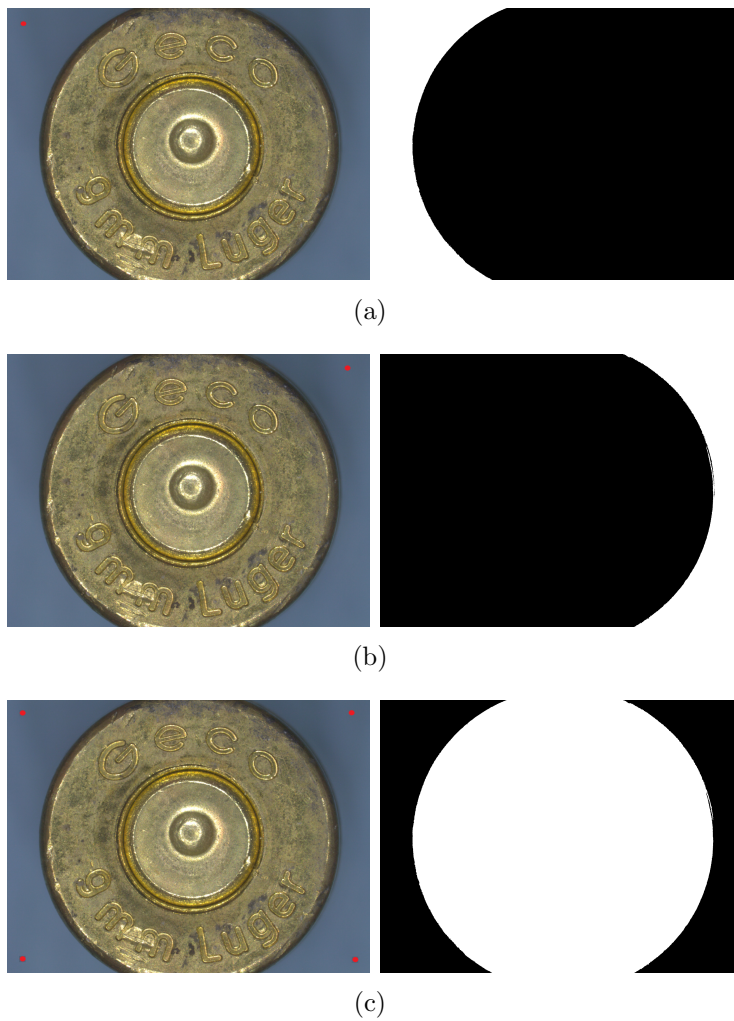


Fig. 5.3: Crescimento de região com valores de *threshold Lower* = 80 e *Upper* = 255. Offset = 50 pixels. (a) 1 semente (canto superior esquerdo) ; (b) 1 semente (canto superior direito) ; (c) 4 sementes .

respeito ao tamanho da vizinhança, é necessário especificar a extensão da vizinhança que se pretende cobrir em cada iteração.

Para a segmentação de imagem com base no crescimento de região, o ITK possui outros algoritmos [71]:

- *Otsu Segmentation*: O objetivo deste algoritmo é encontrar o valor de *threshold* que classifique a imagem em dois grupos, de tal forma que a área sob o histograma de um dos grupos seja minimizada. Isto é equivalente a minimizar a variância dentro de um classe;
- *Neighborhood Connected*: Este algoritmo é uma variante do algoritmo de crescimento de região *Connected Threshold*. Enquanto que o algoritmo *Connected Threshold* considera um pixel na região se o valor da sua intensidade se encontrar no intervalo definido pelos valores de *threshold*, este algoritmo irá considerar o pixel na região, se todos os pixels da vizinhança possuírem intensidades cujos valores se encontram no intervalo definido;
- *Confidence Connected*: O critério utilizado por este algoritmo é baseado em estatística. Inicialmente, o algoritmo calcula a média e o desvio padrão dos valores das intensidades de todos os pixels incluídos na região. De seguida, um fator é definido pelo utilizador, para ser multiplicado pelo desvio padrão e definir um intervalo em torno da média. Os pixels vizinhos cujos valores de intensidade se encontrem dentro deste intervalo são aceites e incluídos na região;
- *Isolated Connected*: Este algoritmo é uma variante próxima do algoritmo de crescimento de região *Connected Threshold*. Neste algoritmo, dois pixels de semente e o valor de *lower threshold* são inicialmente definidos pelo utilizador. De seguida, ocorre crescimento de região numa das sementes, e o valor de *upper threshold* será determinado automaticamente com base na diferença entre os dois pixels de semente;

5.1.2 Alinhamento de Imagem

O alinhamento de imagem é o processo que define a transformada espacial para o mapeamento de pontos de uma imagem, entre pontos homólogos de um objeto numa segunda imagem [71]. Os componentes da estrutura do algoritmo de alinhamento, assim como as suas interligações são apresentados na Figura 5.4.

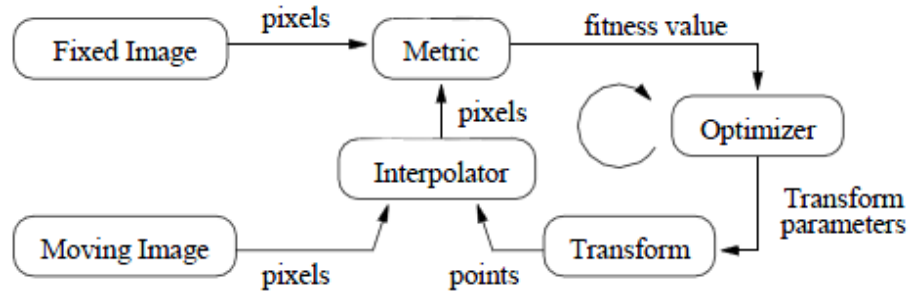


Fig. 5.4: Componentes básicos de um algoritmo de alinhamento [71].

O algoritmo de alinhamento recebe como *input* duas imagens: uma é definida como imagem fixa $f(X)$, e outra como imagem móvel $m(X)$. O alinhamento constitui um problema de otimização, onde o objetivo passa por encontrar o mapeamento espacial que alinha a imagem móvel com a imagem fixa, através da transformação. O interpolador, por sua vez, é utilizado para avaliar as intensidades da imagem móvel, enquanto que a componente de métrica fornece uma medida, que indica se a imagem móvel foi bem alinhada com a imagem fixa. Isto é, compara os valores de intensidade na imagem fixa, com os correspondentes da imagem móvel transformada. Esta medida constitui um critério quantitativo, que é utilizado pelo otimizador, na otimização do valor da métrica definido pelos parâmetros da transformada. Assim, o otimizador deverá encontrar o valor máximo, ou mínimo, dependente do critério, no espaço de pesquisa desses fatores, que indica a transformação que melhor corresponde às imagens envolvidas. Na Figura 5.5 é apresentado um exemplo de alinhamento para um par de invólucros.

Assim, para o desenvolvimento de um algoritmo de alinhamento de imagens, é necessário definir-se uma seleção específica de cada um dos elementos básicos anteriormente descritos (duas imagens de entrada, uma transformação, uma métrica, um interpolador e um otimizador). Para tal, a biblioteca ITK disponibiliza diversos algoritmos para cada um dos elementos de alinhamento, e desse conjunto, foram selecionados os seguintes [72]:

- **Transformação:**

- *Euler 2D Transform*: Composta por uma rotação plana, seguida de uma translação nas coordenadas (x,y) , e considera uma transformação rígida em 2D centrada na origem do sistema de coordenadas. Para o algoritmo de alinhamento de imagem desenvolvido no âmbito da presente dissertação, esta transformação foi a escolhida;

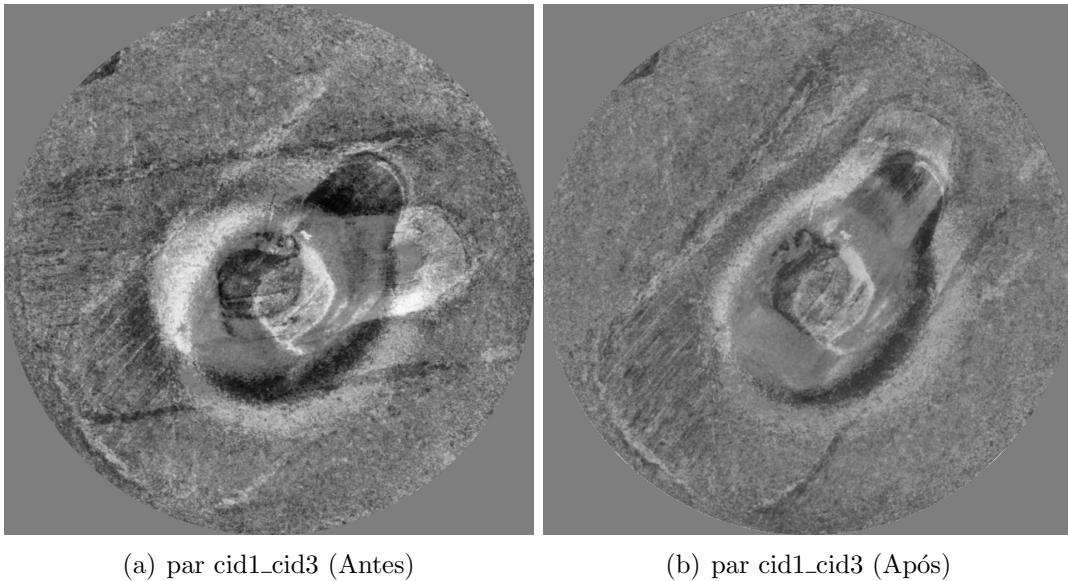


Fig. 5.5: Resultados do alinhamento de imagem com elemento de métrica *Normalized Correlation* para um par de invólucros (antes e após alinhamento).

- **Métrica:**

- *Normalized Correlation Image To Image Metric*: Esta métrica calcula a correlação entre pixels da imagem fixa e pixels da imagem móvel. A correspondência espacial entre a imagem fixa e móvel é estabelecida através de uma transformação. Para o algoritmo de alinhamento de imagem desenvolvido no âmbito da presente dissertação, esta métrica foi a escolhida;

- **Interpolador:**

- *Nearest Neighbor Interpolate Image Function*: Interpola a intensidade da imagem em pixels não inteiros, utilizando a intensidade da posição mais próxima na grelha que mapeia a imagem fixa para as *non-grid positions* da imagem móvel. Para o algoritmo de alinhamento de imagem desenvolvido no âmbito da presente dissertação, este interpolador foi o escolhido;

- **Otimizador:**

- *Regular Step Gradient Descent Optimizer*: O mínimo local da função é encontrado após um certo número de etapas de minimização consecutivas. Para o algoritmo de alinhamento de imagem desenvolvido no âmbito da presente dissertação, este otimizador foi o escolhido;

De realçar que o ITK não inclui funcionalidades de visualização ou de operações mais abrangentes de processamento, como é o caso dos filtros utilizados para melhorar a qualidade de imagem. Assim, é necessário servir-se de outras ferramentas para efetuar estas tarefas, como por exemplo a biblioteca open-source VTK (Visualization Toolkit). Esta última, distribuída livremente pela empresa Kitware Inc., uma das entidades que pertence ao consorcio que suporta o ITK, contém diversas classes escritas em C++, que incluem métodos para processamento e visualização de imagem.

5.2 VTK - *Visualization Toolkit*

O VTK é uma ferramenta orientada a objetos, desenvolvida para computação gráfica, visualização e processamento de imagem. É distribuído livremente pela empresa *Kitware Inc.*, uma das entidades que pertence ao consorcio que suporta o ITK, e contém diversas classes escritas em C++ e várias camadas de interfaces para *Tcl/TK*, *Java* e *Python*. O seu download pode ser feito a partir da respetiva página web². Atualmente, o VTK é utilizado em aplicações comerciais, em investigação e desenvolvimento de aplicações, encontrando-se na base de muitas ferramentas de visualização, tais como, *Paraview*, *VisIt*, *VisTrails*, *Slicer*, *MayaVi* e *OsiriX*.

No âmbito da presente dissertação, esta ferramenta revelou-se muito útil no desenvolvimento de algoritmos aplicados a imagens de invólucros. Pelo facto do software Leica, utilizado na aquisição de imagem, não possuir licença para usufruir de ferramentas computacionais que permitem a reconstrução 3D da superfície do invólucro, houve necessidade de desenvolver um algoritmo que permitisse solucionar esta lacuna. Este algoritmo, designado *Elevation Map*, utiliza uma imagem de textura (montage.jpg), que, quando moldada a um mapa de profundidade (depth Map.tif), origina uma superfície tridimensional. Para a fusão destas duas imagens bidimensionais, utilizou-se o filtro *vtkMergeFilter*. Este filtro, extrai componentes de diferentes conjuntos de dados, e funde-os num único. Para a extração e deformação de pontos estruturados do mapa de profundidade, foram utilizados os filtros *vtkImageDataGeometryFilter* e *vtkWarpScalar*, respetivamente, de forma a produzir uma geometria, à qual a imagem de textura se vai moldar e originar a superfície 3D. Para a sua visualização e interação com o utilizador, utilizou-se o filtro *vtkRenderWindowInteractor*. A sua implementação fornece um mecanismo de interação, com o rato e o

² <http://www.vtk.org/>

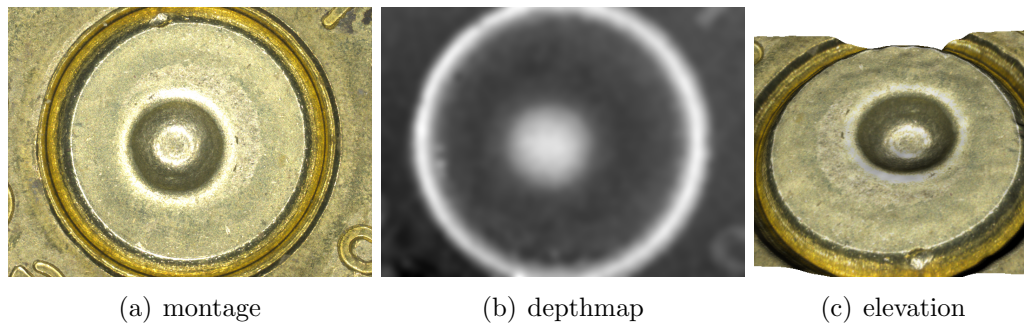


Fig. 5.6: Reconstrução tridimensional da superfície da região do primário (*elevation*), a partir das imagens *montage* e *depthmap*.

teclado, através de uma janela (Figura 5.7) que surge independentemente.

5.3 ITK SNAP

O ITK SNAP é uma aplicação utilizada para a segmentação de estruturas em imagens. Esta ferramenta permite a segmentação semiautomática com base em métodos de contorno de estruturas, assim como delineamento manual. O ITK SNAP é um software de distribuição livre³ para uso acadêmico e comercial, e o seu desenvolvimento e manutenção é possível graças a doações do Instituto Nacional de Saúde dos EUA e ao tempo despendido pelos seus membros da comunidade de desenvolvimento. Algumas das principais vantagens do ITK SNAP incluem:

- Segmentação manual em três planos ortogonais em simultâneo;
- Interface amigável para a seleção de parâmetros de segmentação de contornos;
- Suporte para diversos formatos de imagem, incluindo VTK.
- Ferramentas de corte no plano para rápido pós-processamento dos resultados da segmentação.

Na Figura 5.8 é apresentado um exemplo de segmentação manual da região da base do invólucro. A partir da região etiquetada é possível extrair um conjunto de parâmetros, entre os quais, o valor aproximado da área da região circular, e conseqüentemente, determinar o valor aproximado do diâmetro equivalente dessa região, de acordo com a Equação 6.1. Este método manual revela-se demorado e

³ <http://www.itksnap.org/>

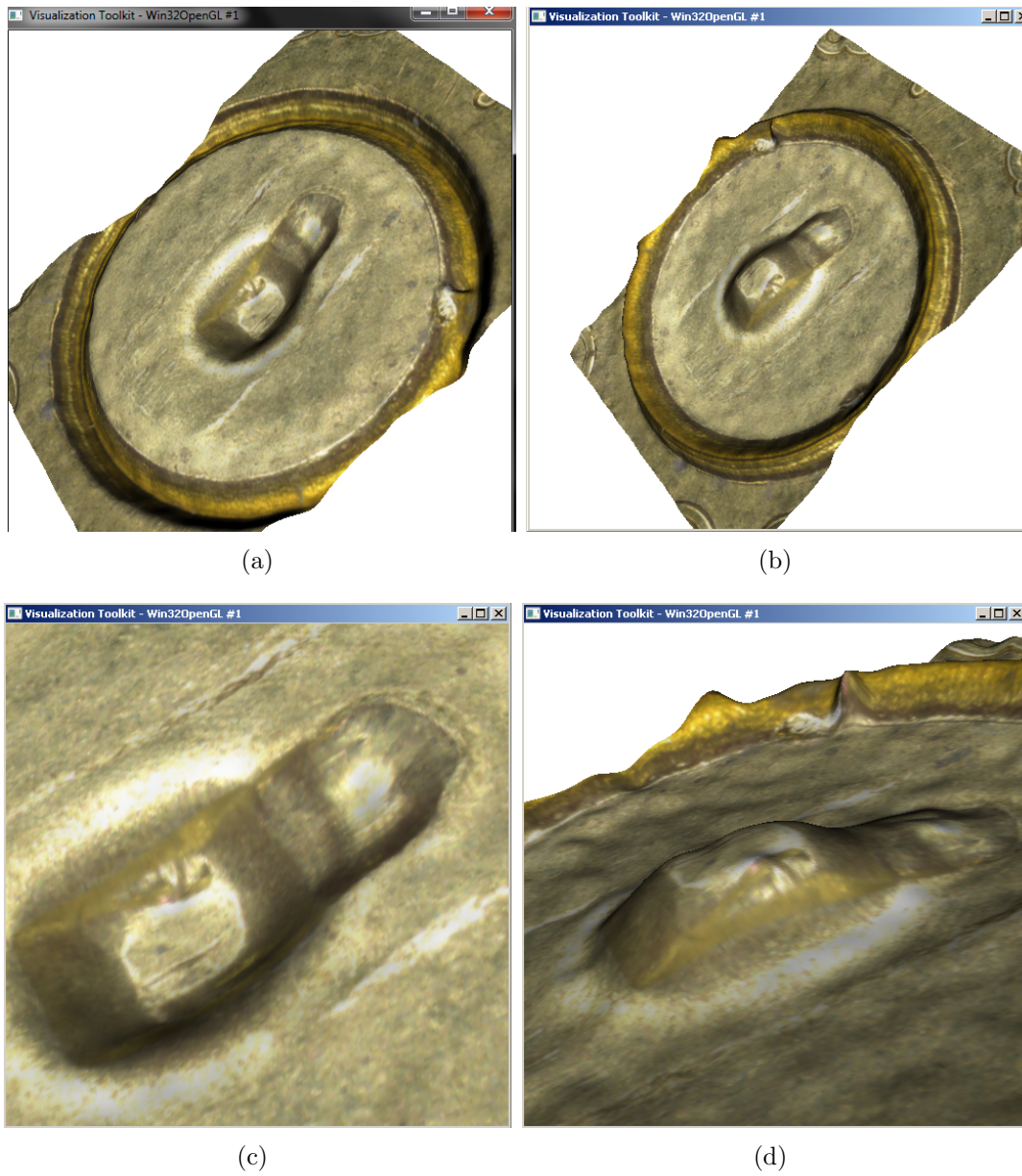
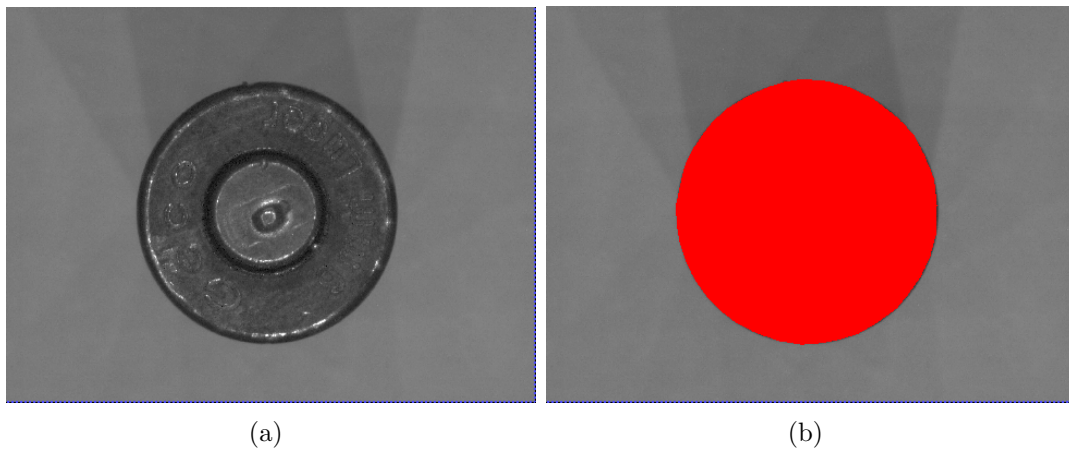


Fig. 5.7: Exemplo de reconstrução de superfície, ilustrando as diversas funcionalidades de interação e visualização do VTK.



(a) (b)

	Label Id	# Voxels	Volume (mm ³)	Mean(image)	S.D. (image)
Clear Label	0	2334332	219.5	119.27	7.55821
Label 1	1	801672	75.3821	71.5989	21.1433

(c)

Fig. 5.8: ITK SNAP - Segmentação manual de uma região de interesse, relativa à região da base do invólucro. Imagem (a) original e (b) etiquetada; (c) janela de visualização dos parâmetros relativos à imagem original e região etiquetada.

dependente do utilizador, no que respeita à definição dos contornos da região de interesse, e como tal, foi desenvolvido um algoritmo de segmentação automático (ver secção 6.1) que permite reduzir o tempo despendido nesta tarefa, revelando-se simultaneamente mais eficiente.

5.4 ParaView

O *Paraview* é uma aplicação desenvolvida pela *Kitware Inc* para a visualização e análise de conjuntos de dados, definidos no espaço bidimensional e tridimensional. Esta aplicação é distribuída gratuitamente, e o seu download pode ser feito a partir

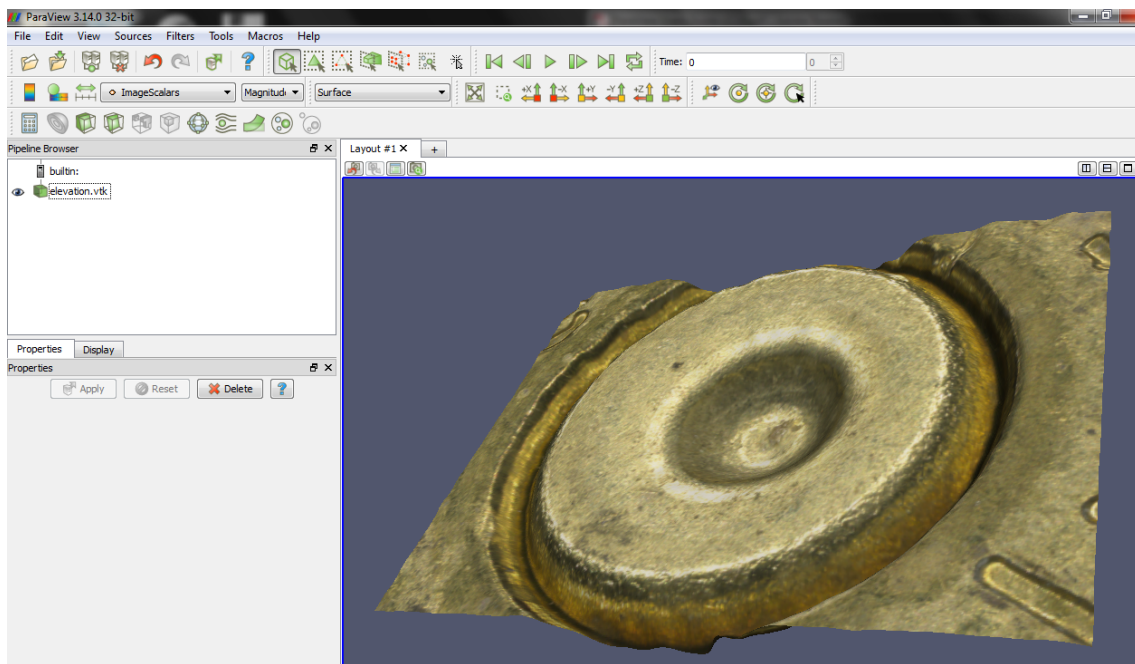


Fig. 5.9: Ecrã Principal - Paraview, com exibição de superfície tridimensional da região *head* do invólucro.

da respetiva página web⁴. Utiliza as bibliotecas VTK como motor de processamento e renderização, e a sua interface de utilização foi escrita utilizando a linguagem QT[®]. No âmbito desta dissertação, utilizou-se a versão 3.14.0 do *Paraview*, essencialmente para visualização, interação e validação das superfícies 3D da região *head* dos invólucros, como se pode visualizar na Figura 5.9.

5.5 MySQL Workbench

O *MySQL Workbench* trata-se de uma plataforma de administração, utilizada para trabalhar com servidores de bases de dados *MySQL*, e inclui ferramentas avançadas de modelação e *design* de bases de dados, desenvolvimento de *queries* e configuração e monitorização do servidor. Uma base de dados é definida como um conjunto estruturado de informação, fortemente definida, informatizada, partilhável e sujeita a um controlo central, e é composta por um conjunto de tabelas e associações entre estas.

Esta ferramenta gráfica é distribuída gratuitamente pela *Oracle Corporation* e

⁴ <http://www.paraview.org/>



Fig. 5.10: Ecrã Principal - Workbench 5.2.

o seu download pode ser feito a partir da respetiva página web⁵. No que respeita à sua funcionalidade, esta ferramenta é constituída por 3 áreas principais (Figura 5.10):

- Desenvolvimento da linguagem SQL (*Structured Query Language*): Permite criar e gerir conexões com servidores de bases de dados, e capacidade de executar consultas SQL em conexões de bases de dados;
- Modelação de dados: Permite criar modelos do esquema da base de dados que o utilizador pretende, fácil edição das tabelas que constituem a base de dados, assim como das colunas, índices, privilégios, rotinas e visualizações;
- Administrador do servidor: Permite criar e administrar as instâncias do servidor.

⁵ <http://www.mysql.com/>

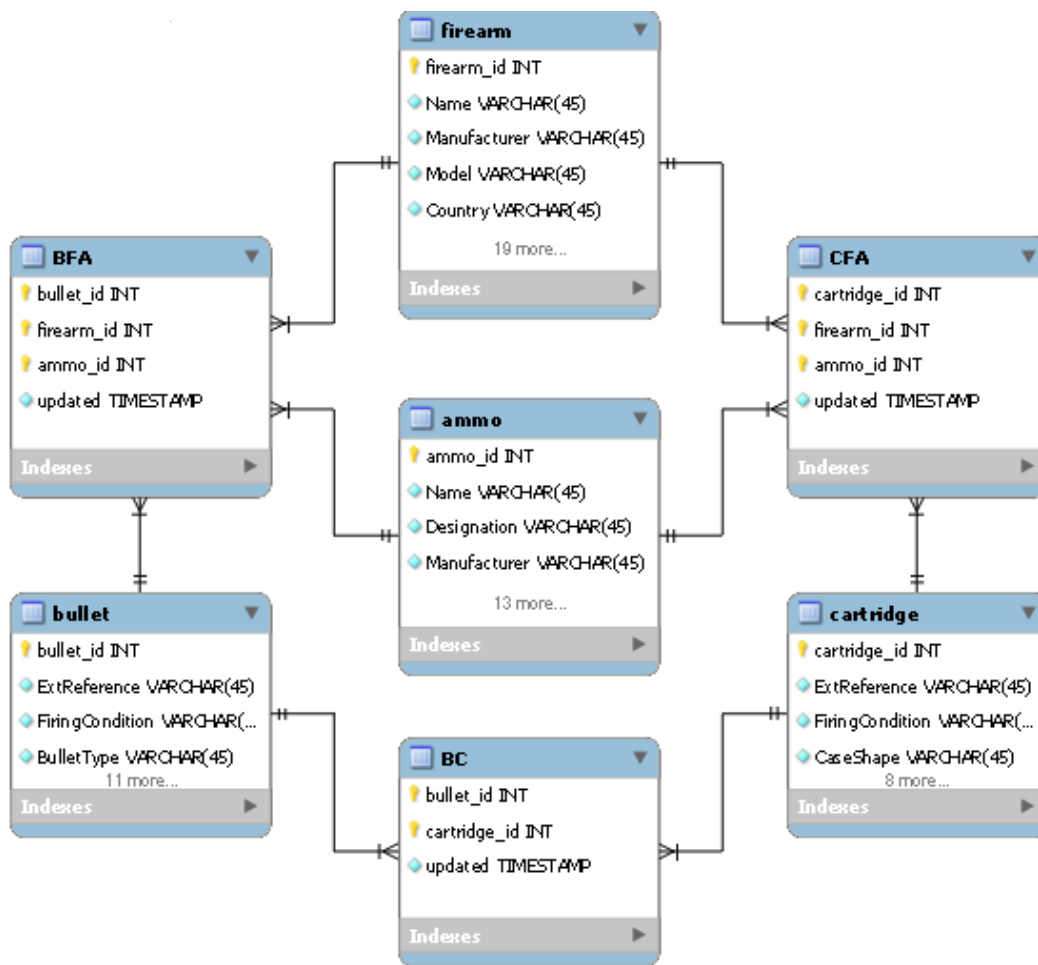


Fig. 5.11: Modelo relacional normalizado, da base de dados *ballistics*, usado para o registo e armazenamento de dados das evidências utilizadas neste trabalho.

Esta ferramenta foi utilizada para documentação e gestão da informação relativa às evidências balísticas, de forma a garantir a resposta rápida aos pedidos de informação, integridade da informação, flexibilidade na relação entre dados e melhor gestão da informação. Assim, foi desenvolvida uma base de dados, cujo modelo relacional normalizado pode ser visualizado na Figura 5.11. A base de dados é constituída essencialmente por 4 tabelas relativas às evidências balísticas consideradas (arma de fogo, munição, invólucro e projétil) e por 3 tabelas que estabelecem correspondência entre as evidências (BFA, CFA e BC). Desta forma, garante-se o registo e o armazenamento dos dados das evidências de forma conveniente e organizada.

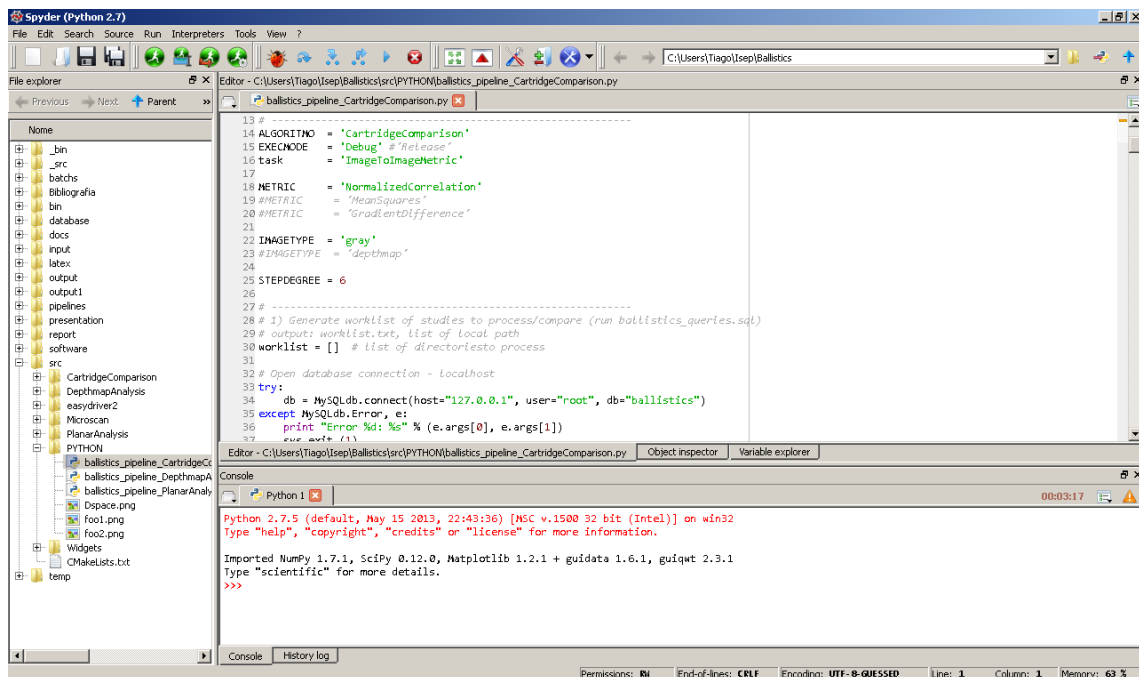


Fig. 5.12: Python 2.7 - Ambiente de desenvolvimento científico interativo *Spyder*.

5.6 Python

O Python é um linguagem de programação orientada a objetos, de distribuição gratuita⁶, que é utilizada numa grande variedade de domínios de aplicação, como cálculos numéricos, análise e visualização de dados. Este software permite a escrita rápida de código, e, graças a um compilador altamente otimizado, o Python executa-o de forma bastante rápida, quando comparado com as restantes aplicações. No âmbito do presente trabalho, foi utilizada a versão 2.7 do Python (*python.xy*) (Figura 5.12) devido essencialmente à sua integração com as restantes aplicações utilizadas. Este software funciona como motor de todos os algoritmos de processamento desenvolvidos no âmbito deste trabalho (com recurso às bibliotecas ITK e VTK), pelo facto de os executar de forma automática e de forma sequencial. Ao invés do processamento ser realizado de forma individual para cada uma das evidências, são definidos os parâmetros necessários para o processamento, assim como o caminho dos executáveis e das pastas onde se encontram as imagens. Esta abordagem apresenta várias vantagens, como por exemplo, a redução do tempo consumido no processamento de grandes quantidades de imagens, e, após o processamento são construídos gráficos com os resultados obtidos, de forma automática.

⁶ <http://www.python.org/>

Inicialmente, o Python começa por se conectar à base de dados (*ballistics*), desenvolvida com recurso à ferramenta *MySQL Workbench*. De seguida, através de uma *query* são selecionados da tabela *Study* (tabela com todos os estudos realizados) e da tabela *CFA* (tabela com relação entre invólucros, armas de fogo e munições), todos os invólucros cujo estudo foi realizado e os que foram deflagrados pelas armas de fogo Glock 17 (FID = 1) e Walther P38 (FID = 2), respetivamente. Com base nos resultados obtidos, é definido o caminho da pasta onde as imagens a processar se encontram (`Ballistics\input\EvidenceType\EvidenceID\BodyPart\Modality\Magnification`), os argumentos necessários a cada algoritmo e a diretoria onde se encontra o executável de cada algoritmo. Desta forma, o processamento ocorre apenas para as imagens relativas às evidências que se consideraram para estudo, e no final do processamento, são examinados os resultados obtidos, no sentido de se produzirem gráficos que facilitem a sua análise.

Algoritmos Implementados - Invólucros

No âmbito deste trabalho, foram desenvolvidos 3 conjuntos de algoritmos de processamento de imagem, que serão aplicados às imagens relativas aos 2 grupos de invólucros definidos na secção 3.5.

O primeiro algoritmo (Segmentação Planar) é aplicado a imagens provenientes da modalidade de aquisição Planar, e tem como objetivo determinar o diâmetro da região *head* do invólucro, e, com base nesse valor, extrair uma região de interesse da base do invólucro. A partir do valor do diâmetro do invólucro é também possível deduzir o calibre da munição que o originou.

O segundo algoritmo (Análise do mapa de profundidade), é aplicado a imagens provenientes da modalidade de aquisição Multifocus, e tem como objetivo principal, extrair uma região de interesse da região do primário do invólucro, com base na imagem do mapa de profundidade. Este passo é necessário para se determinar o diâmetro e o centro do círculo do primário. Para tal, foram definidos passos intermédios para a correção do plano de inclinação (para garantir perpendicularidade), deteção do círculo *primer pocket gap* e extração do círculo do primário.

Assim que as regiões de interesse forem extraídas, o terceiro algoritmo (Alinhamento de imagem) vai transladar essas imagens, duas a duas, para uma origem comum, de forma a obterem-se círculos concêntricos, e o alinhamento de imagem inicia-se, através da rotação de uma das imagens. Para cada deslocamento angular é registado o valor de similaridade entre as imagens, através do elemento de métrica.

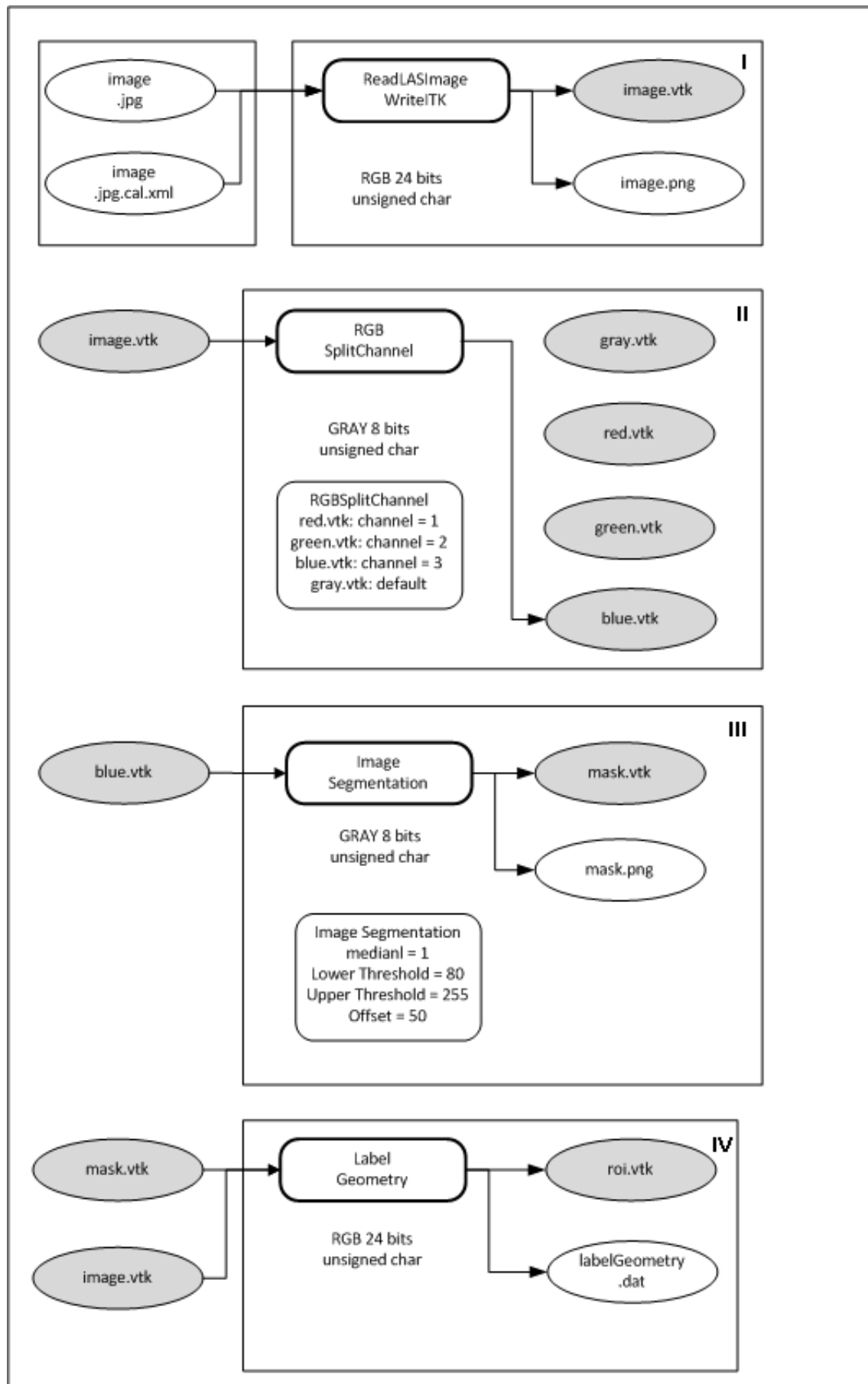


Fig. 6.1: Pipeline - Algoritmo de Segmentação Planar implementado para o estudo de invólucros ($6\times$), modalidade *Planar*, para determinação de uma região de interesse e diâmetro equivalente da base do invólucro.

6.1 Segmentação Planar

O algoritmo de segmentação planar é aplicado a imagens e invólucros (região *head*), provenientes da modalidade de aquisição Planar (*image.jpg*), e tem como objetivo determinar o diâmetro da região da base do invólucro, e, com base nesse valor, extrair uma região de interesse. A partir do valor do diâmetro do invólucro é também possível deduzir o calibre da munição que o originou. Para a consecução dos objetivos, foram desenvolvidos os seguintes algoritmos, que no seu conjunto, compõem o algoritmo de segmentação planar:

1. *Read LAS Image Write ITK*;
2. *RGB Split Channel*;
3. Segmentação de Imagem;
4. *Label Geometry*.

6.1.1 Conversão de Formato

O algoritmo *ReadLASImageWriteITK* é utilizado para converter a imagem proveniente do microscópio de comparação, com formato JPG (Figura 6.3(a)), e respetivo ficheiro XML, num formato mais conveniente, o formato VTK. Para tal, este algoritmo tem como *input* os dois ficheiros provenientes da modalidade de aquisição de imagem *planar*. De forma a conjugar a informação do ficheiro XML com a imagem JPG, o algoritmo começa por selecionar (no ficheiro XML) o nó *LasImage*, e de seguida, no seu interior, os seguintes parâmetros:

```
...
<LasImage>
  <UnitName>Millimeters</UnitName>
  <XMetresPerPixel>9.69696044921875E-06</XMetresPerPixel>
  <YMetresPerPixel>9.69696044921875E-06</YMetresPerPixel>
  <BitDepth>24</BitDepth>
  <NumPixelsX>2047</NumPixelsX>
  <NumPixelsY>1532</NumPixelsY>
  <DecimalPlaces>3</DecimalPlaces>
  ...
</LasImage>
...
```

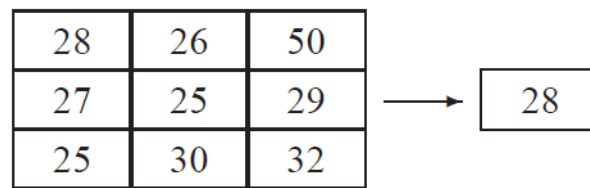


Fig. 6.2: Efeito local do filtro de mediana [71].

Com os parâmetros seleccionados, é definida a dimensão da imagem (*image size*: 2047×1532 pixel), o espaçamento do pixel (*pixel spacing*: $dX = dY = 9.70 \mu\text{m}$) e o tipo de pixel (*PixelFormat*: RGB 24 bits).

6.1.2 Conversão para Cinzento

Após a conversão do formato da imagem JPG e respetivo ficheiro XML para o formato VTK, converte-se a imagem a cores (RGB, 24 bits) para níveis de cinzento (*unsigned char*, 8 bits), com recurso ao algoritmo *RGBSplitChannel*. Este algoritmo divide a imagem a cores nos seus 3 canais, *red* (R), *green* (G) e *blue* (B), e dependendo da cor primária do fundo, utilizado durante o processo de aquisição, o canal correspondente é considerado para a segmentação. Devido ao facto de ter sido utilizado, na aquisição de imagem, um fundo de cor azul, o canal azul foi considerado.

6.1.3 Crescimento de Região

Devido ao facto de ter sido utilizado um fundo de cor azul durante o processo de aquisição, a imagem de entrada neste algoritmo será a imagem de saída do algoritmo anterior, correspondente ao 3º canal (imagem: *blue.vtk*). À imagem de entrada, aplicou-se o filtro de mediana *Median Image Filter*, de forma a reduzir o ruído existente. O filtro de mediana calcula o valor de cada pixel de saída como a mediana dos valores dos pixels de entrada da vizinhança. A Figura 6.2 ilustra o efeito local deste filtro. Depois de suavizada a imagem, aplicou-se o filtro *Connected Threshold* para o crescimento de região baseado em sementes. O critério para incluir pixels numa região de crescimento traduz-se na avaliação do valor das suas intensidades, dentro de um intervalo específico [71]. Como tal, este filtro tem como base um intervalo de intensidades definidos pelo utilizador (valores de *lower* e *upper threshold*). Os 2 valores não deverão ser muito próximos nem muito distantes. Se forem próximos, a região de crescimento será pouco flexível, por outro lado, se os valores forem muito distantes, a região terá tendência a englobar toda a imagem [71]. Para as evidências

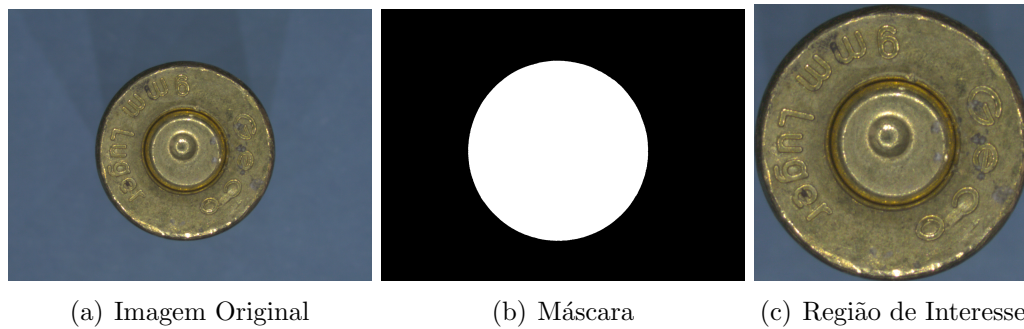


Fig. 6.3: Obtenção da região de interesse na imagem original ($CID = 1$), com base no diâmetro equivalente do objeto segmentado (máscara).

estudadas, utilizaram-se os valores 80 e 255, para *lower* e *upper threshold*, respectivamente. Para além dos valores de *threshold* definidos, é necessário definirem-se pontos de semente, a partir dos quais o crescimento de região se vai iniciar. Para o algoritmo desenvolvido no âmbito deste trabalho, definiram-se 4 sementes, para garantir o crescimento de região em torno da evidência estudada (ver secção 5.1.1). À saída deste algoritmo obtém-se uma imagem com um objeto preto em fundo branco, que será invertido, através da utilização do filtro de negação *Not Image Filter*. De seguida aplicou-se o filtro *Connected Component*, que tem como função a etiquetagem de objetos. A cada objeto distinto é atribuído um valor diferente de 0, enquanto que o fundo é ajustado a 0. Um objeto, é definido como um conjunto de pixels conectados, diferentes de 0, sendo que, em 2 pixels conectados é possível construir um caminho, incluindo apenas pixels não nulos entre eles [73]. Por fim, aplicou-se o filtro *BinaryThreshold* à imagem anteriormente etiquetada, para transformar a imagem previamente etiquetada numa imagem binária, através da modificação dos parâmetros dos pixels. Para tal, são definidos no código 2 valores de intensidades (*inside Value = 255* e *outside Value = 0*) e valores de *threshold* que determinam os objetos que se pretendem visualizar. Dado que se pretende segmentar a região *head*, definiu-se *Lower Threshold = 1* e *UpperThreshold = 1*, correspondente à maior região [71]. Deste processamento, resulta a imagem ilustrada na Figura 6.3(b).

6.1.4 Análise de Components Conetados

Com base no objeto segmentado, é possível extrair várias características morfológicas a partir do algoritmo *LabelGeometry*, tais como a área, comprimento do eixo maior e menor (*Major Axis Length* e *Minor Axis Length*) da região segmentada, e ainda a excentricidade e alongação [74]. Para além dos parâmetros enunciados an-

teriormente, este algoritmo permite também definir uma região de interesse (ROI) na imagem RGB (ampliação= 6x). Assim, este algoritmo tem como *input* a imagem de saída do algoritmo de segmentação (mask.vtk), da qual serão extraídas as características morfológicas, e a imagem original, convertida para o formato vtk, na qual será extraída a região de interesse. Para tal define-se $\Delta X_{roi} = \Delta Y_{roi} = D_{rim}$, onde ΔX_{roi} e ΔY_{roi} representam as dimensões XY da região de interesse e D_{rim} representa o diâmetro da região da base invólucro, que pode ser calculado da seguinte forma:

$$D_{rim} = 2\sqrt{A/\pi}, \quad (6.1)$$

A variável $A = n \cdot dA = n \cdot dXdY$ diz respeito à área do objeto segmentado, calculada pela contagem do número n de pixels brancos contidos na máscara binária. O centroid $C(X_c Y_c)$ do objeto segmentado é também considerado, uma vez que representa o centro da região *head* do invólucro e por sua vez, da região de interesse extraída. A ROI caracteriza-se como uma *bounding box* (caixa delimitadora) de um círculo de diâmetro D_{rim} , centrada nas coordenadas $C(X_c Y_c)$ do objeto segmentado. Um exemplo de uma ROI extraída a partir do algoritmo desenvolvido pode ser visualizado na Figura 6.3(c). O valor do diâmetro foi, desta forma, calculado para todos os invólucros considerados, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.1. De forma a validar os resultados obtidos a partir deste método automático de obtenção do diâmetro, estes foram comparados com os valores determinados a partir do método manual, com recurso ao paquímetro digital, e as diferenças obtidas são apresentadas nos gráficos das Figuras 6.4 e 6.5. Em ambos os gráficos, observam-se 2 patamares distintos, que podem ser justificados pelo facto da aquisição de imagem dos 12 primeiros invólucros e os restantes (27 a 44) terem sido realizadas em dias diferentes, por utilizadores diferentes. Como tal, existiu uma discrepância nas condições de focagem e de iluminação, que resultaram em pequenas variações na obtenção dos valores do diâmetro. No entanto, a diferença média e a diferença média relativa entre os valores de diâmetro obtidos a partir do método automático e método manual, é cerca de -0.16 mm e -1.61%, respetivamente.

6.2 Depthmap - Análise

Para o processamento e análise da região do primário, foram utilizadas as imagens (Montage.jpg e Depth Map.tif) provenientes da modalidade de aquisição de imagem, Multifocus, com uma ampliação máxima que permitisse a visualização total da região

Tab. 6.1: Segmentação Planar: Medidas em milímetros do diâmetro equivalente da região da base do invólucro, obtidas com recurso ao paquímetro e automaticamente (ITK)

CID	Diâmetro do Invólucro (mm)	
	Medição manual	Medição automática
1	9.86	9.81
2	9.91	9.83
3	9.87	9.80
4	9.88	9.79
5	9.91	10.09
6	9.90	9.81
7	9.89	9.82
8	9.89	9.81
9	9.90	9.81
10	9.86	9.78
11	9.86	9.76
12	9.90	9.69
25	11.01	10.76
26	11.03	10.80
27	9.86	9.65
28	9.90	9.70
29	9.90	9.68
30	9.90	9.69
31	9.87	9.64
32	9.92	9.69
33	9.87	9.66
34	9.90	9.67
35	9.88	9.64
36	9.87	9.64
37	9.90	9.66
38	9.87	9.62
39	9.86	9.62
40	9.88	9.65
41	9.90	9.66
42	9.90	9.69
43	9.90	9.67
44	9.90	9.68

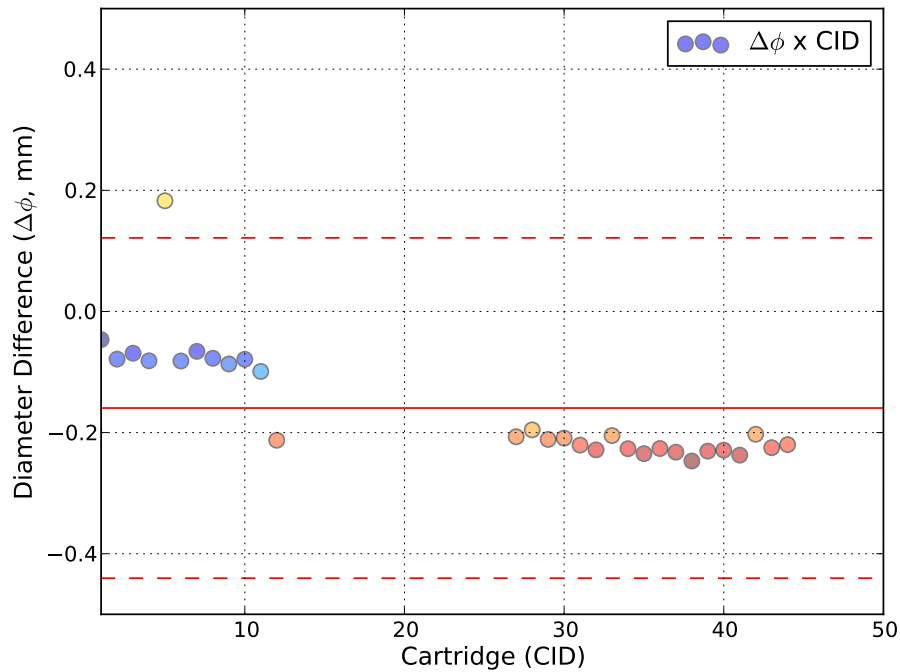


Fig. 6.4: Dispersão dos valores da diferença entre as medidas do diâmetro do invólucro obtidas pelo método automático e método manual.

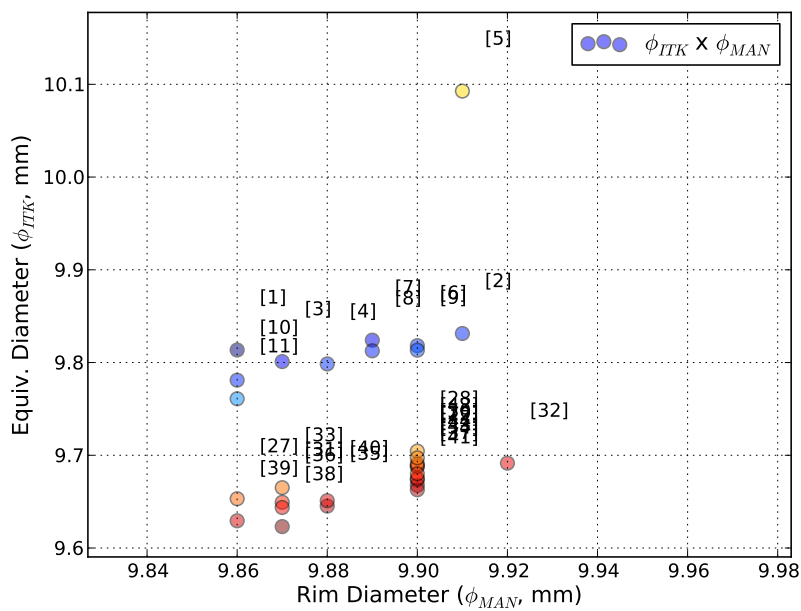


Fig. 6.5: Diferença entre as medidas do diâmetro do invólucro obtidas pelo método automático (Label Geometry - diâmetro equivalente da região *head*) e método manual (paquímetro - diâmetro anelar).

a estudar (Ampliação: 20x). No sentido de se retirar o máximo de informação destas imagens, foram implementados vários algoritmos de processamento:

1. Elevation Map;
2. Correção do mapa de Profundidade;
3. Transformada Polar;
4. Extração de Região de Interesse.

Os algoritmos implementados, assim como a sua integração, podem ser visualizados na pipeline da Figura 6.6, e têm como objetivo principal, extrair uma região de interesse da região do primário do invólucro, com base na imagem do mapa de profundidade. Este passo é necessário para se determinar o diâmetro e o centro do círculo do primário. Para tal, foram definidos passos intermédios para a correção do plano de inclinação (para garantir perpendicularidade), deteção do círculo *primer pocket gap* e extração do círculo do primário.

6.2.1 Reconstrução de Superfície

O algoritmo *Elevation Map* é o primeiro a ser aplicado às imagens provenientes da modalidade *Multifocus*. Tem como input as imagens *Montage.jpg* (RGB 24 bits - unsigned char) (Figura 5.6(a)), *Depth Map.tif* (16 bits - float) (Figura 5.6(b)), e respetivos ficheiros XML (como pode ser visualizado na pipeline da Figura 6.6). Os ficheiros XML possuem informação acerca da dimensão, origem e espaçamento da imagem, e valores de *Stack Start* (início do varrimento Multifocus), *Stack End* (fim do varrimento Multifocus) e *Step Size* (tamanho do passo para o varrimento Multifocus). À semelhança do algoritmo *Read LAS Image Write ITK*, este algoritmo faz a conversão dos ficheiros de saída do microscópio ótico de comparação, para o formato VTK, juntando à imagem de textura e ao mapa de profundidade, a informação contida no ficheiro XML. Para além da conversão das imagens de entrada para o formato VTK, este algoritmo é também utilizado para construir uma superfície 3D (*elevation* - Figura 6.7) da região do primário do invólucro, através da junção da imagem de textura com o mapa de profundidade, como referido na secção 5.2.

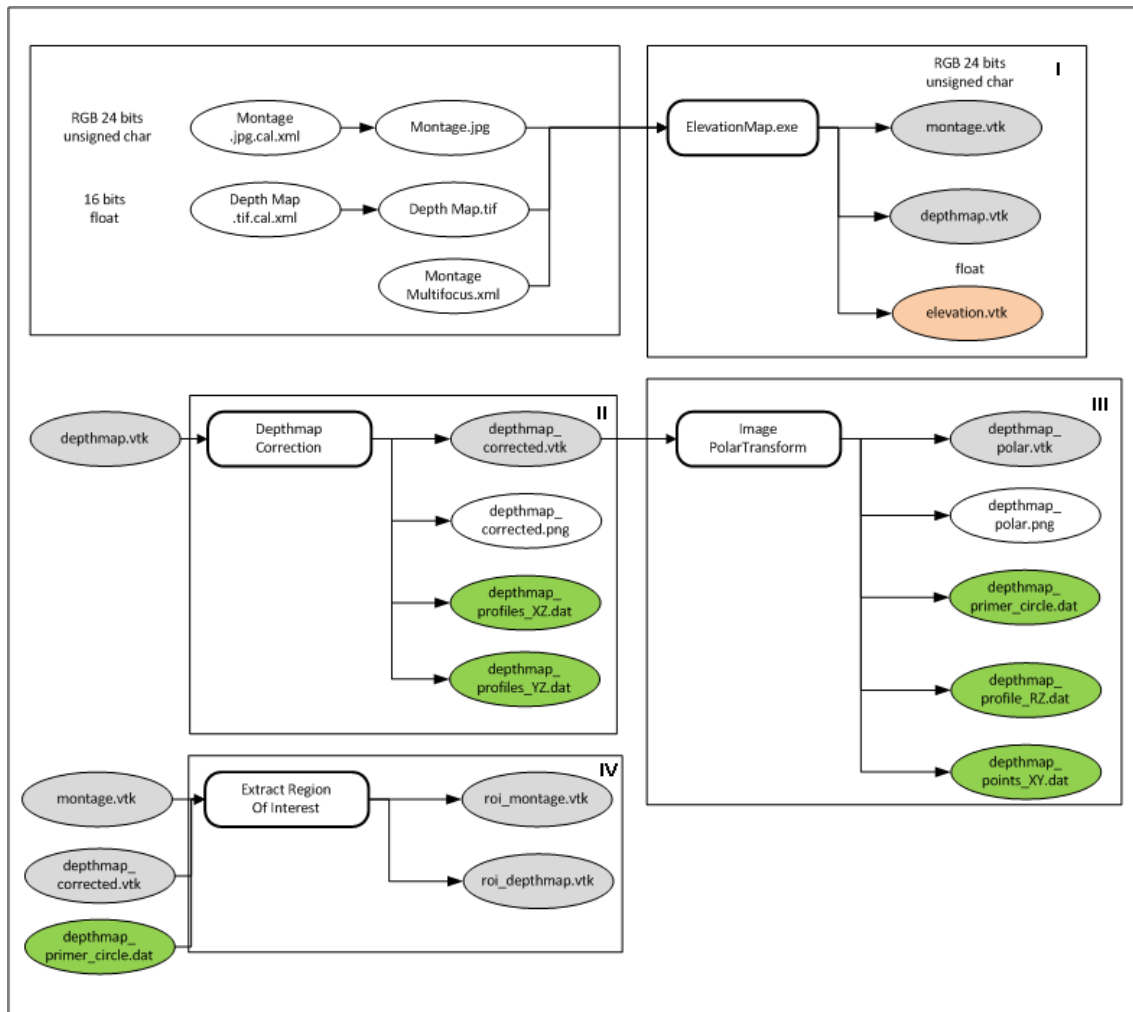


Fig. 6.6: Pipeline - Algoritmo de Análise *Multifocus* implementado para o estudo de invólucros ($20\times$), modalidade *Multifocus*, para determinação de uma região de interesse relativa à região do primário.

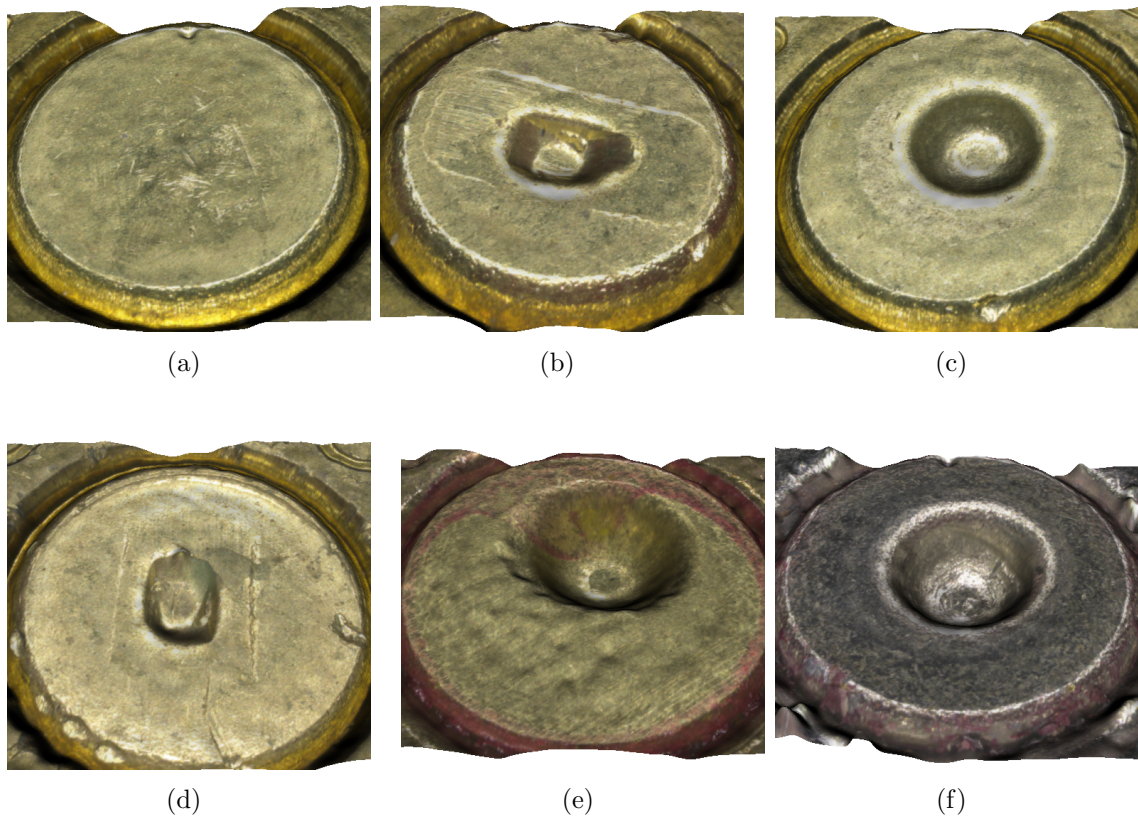


Fig. 6.7: Reconstrução tridimensional da superfície da região do primário, a partir das imagens de textura e mapa de profundidade (ampliação: 20×). Região do primário de um invólucro (a) não deflagrado (munição: 9 mm luger); (b) deflagrado pela arma de fogo Glock 17 (munição: 9 mm luger); (c) deflagrado pela arma de fogo Walther P38 (munição: 9 mm luger); (d) deflagrado pela arma de fogo Glock 17 (munição: 9 mm luger); (e) deflagrado pela arma de fogo Ruger SP 101 (munição: .32 H&R Magnum); (f) deflagrado pela arma de fogo Smith & Wesson 66-4 (munição: 357 Magnum).

6.2.2 Correção do Mapa de Profundidade

De seguida, através do algoritmo *Depthmap_Correction*, procedeu-se à correção de uma possível inclinação do plano coincidente à face do invólucro, na imagem *depthmap.vtk*. Este algoritmo foi desenvolvido com o intuito de otimizar o cálculo da profundidade do percutor, ao longo das direções X e Y, e como tal, torna-se essencial corrigir qualquer inclinação da superfície do invólucro, em cada uma das direções. Como é possível visualizar na pipeline da Figura 6.6, este algoritmo tem como input a imagem *depthmap.vtk*, e como output a imagem *depthmap_corrected.vtk* e os ficheiros *depthmap_profiles_XZ.dat* e *depthmap_profiles_YZ.dat*, cujo conteúdo será posteriormente tratado em Python, para obtenção de gráficos, importantes no estudo da evidência.

Para a correção da inclinação do mapa de profundidade, começaram por ser implementados 2 iteradores, um na direção X e outro na direção Y, de modo a obter-se o perfil médio (z_1 e z_2 , respectivamente) da face do invólucro em cada uma das direções. O perfil médio é obtido com base na intensidade dos pixels da imagem *depthmap.vtk*. Obtidos os perfis nas respetivas direções, determinaram-se por simetria em relação ao eixo y (reflexão), os perfis f_1 e f_2 , de tal forma que: $z_1 = -f_1$ e $z_2 = -f_2$. De seguida, para cada uma das direções, foram traçadas retas obtidas por regressão linear nos perfis z e f , e o ângulo formado pela interseção dessas duas retas, representa o dobro do ângulo correspondente à inclinação. Com a determinação do ângulo de inclinação em cada uma das direções, os pontos que compõem a superfície são ajustados, de forma a que o ângulo de inclinação seja 0. Ao perfil da superfície corrigida na direção x e y, chamou-se h_1 e h_2 , respectivamente. Os 3 perfis obtidos para cada direção, descritos anteriormente, podem ser visualizados na Figura 6.8(a) e (c). Na Figura 6.8(b) e (d), é apresentada a diferença de profundidades ao longo das direções x e y, respetivamente. Esta diferença é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$d_1 = \frac{z_1 - f_1}{2} \quad (6.2)$$

Nas Figuras 6.9 e 6.10 são apresentadas as imagens e respetivos histogramas das imagens *depthmap.vtk* e *depthmap_corrected.vtk*, respetivamente. No que respeita aos histogramas, verifica-se que antes da correção, o histograma da imagem *depthmap.vtk* apresenta maior dispersão de pixels para diferentes níveis de profundidade, enquanto que no histograma da imagem corrigida (*depthmap_corrected.vtk*), existe uma maior concentração de pixels para uma determinada profundidade, confirmando desta forma a correção da inclinação outrora existente.

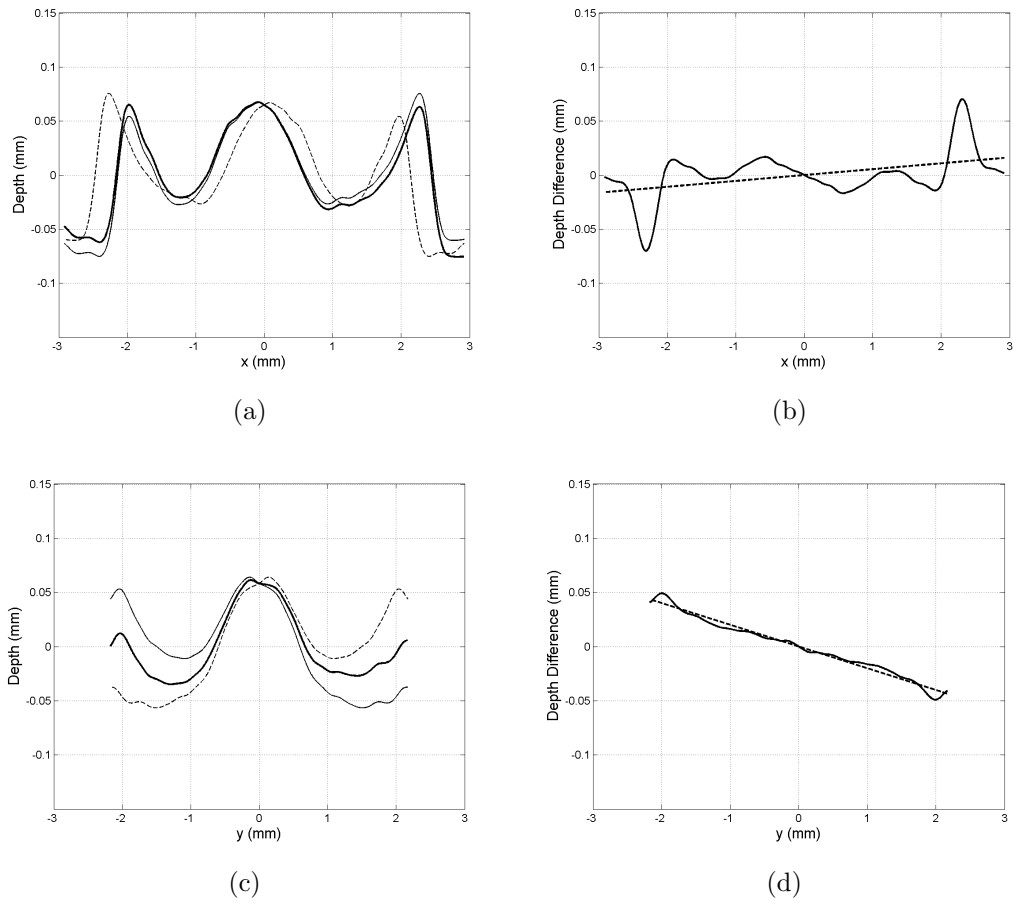


Fig. 6.8: Correção da inclinação na imagem *depthmap.vtk*. (a) Correção da inclinação na direção X (reta simples: perfil z1; reta tracejada: perfil f1; reta a negrito: perfil h1); (b) Inclinação da superfície na direção X; (c) Correção da inclinação na direção Y (reta simples: perfil z2; reta tracejada: perfil f2; reta a negrito: perfil h2); (d) Inclinação da superfície na direção Y.

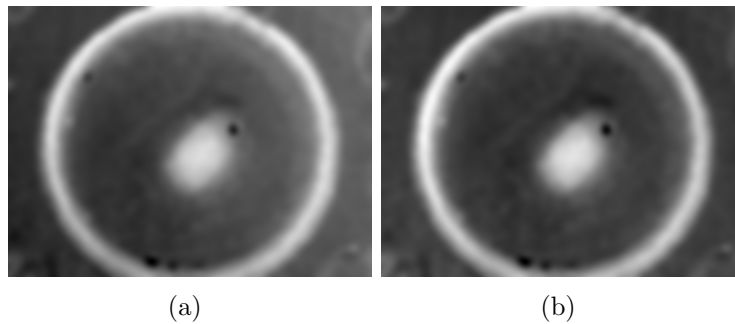


Fig. 6.9: Imagem Depthmap (CID = 1); (a) Antes e (b) após aplicação do algoritmo de correção.

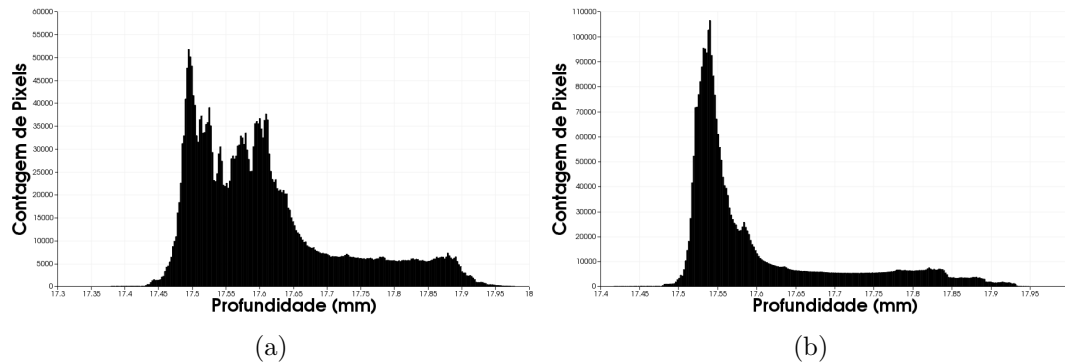


Fig. 6.10: Histograma da imagem Depthmap (CID = 1); (a) Antes e (b) após aplicação do algoritmo de correção.

6.2.3 Transformada Polar

Após a correção da imagem *depthmap.vtk*, procedeu-se à sua transformação do domínio cartesiano para o domínio polar, com recurso ao algoritmo *Image Polar Transform*. Com este algoritmo, pretende-se adquirir informação, tal como o perfil radial médio da superfície do invólucro, o qual permite extrapolar o diâmetro do primário e também a profundidade média ao longo deste. A transformada polar caracteriza-se como uma transformada geométrica, que transforma coordenadas cartesianas em coordenadas polares, e em processamento de imagem, esta transformada é usualmente utilizada para contornar a necessidade de rotação em torno da origem nas coordenadas cartesianas, sendo substituída pelo movimento de translação.

O algoritmo de transformação polar desenvolvido, tem como *input* a imagem *depthmap_corrected.vtk*, obtida através do algoritmo de correção do mapa de profundidade, e como *output* a imagem *depthmap_polar.vtk* e os ficheiros *depthmap_profile_RZ.dat*, *depthmap_points_XY.dat* e *depthmap_primer_circle.dat*. O conteúdo das imagens e ficheiros de saída, assim como a sua funcionalidade e métodos utilizados para a sua obtenção serão apresentados de seguida. Inicialmente, converteu-se a imagem *depthmap_corrected.vtk* de coordenadas cartesianas, para coordenadas polares, resultando na imagem *depthmap_polar.vtk*. O sistema de coordenadas polares é um sistema bidimensional (2D), no qual, um determinado ponto P do plano é determinado pela distância (r) a um ponto O fixo (origem) e por um ângulo (θ) [75]. A relação entre as coordenadas polares (r, θ) e as coordenadas cartesianas é apresentada na seguinte

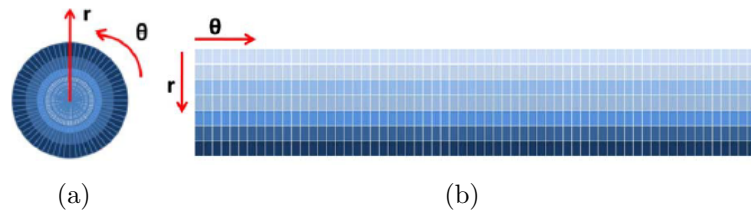


Fig. 6.11: Representação gráfica do mapeamento da transformada polar: (a) Amostragem da transformada polar aplicada a coordenadas cartesianas; (b) a resultante distribuição da amostragem na direcção angular e radial [76].

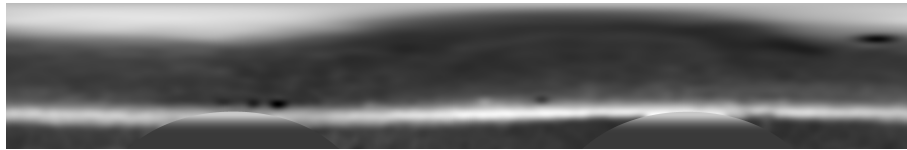


Fig. 6.12: Mapeamento da transformada polar: resultado da distribuição da amostragem nas direcções angular e radial.

equação (Equação 6.3):

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \begin{cases} \arccos\left(\frac{x}{r}\right) & y \geq 0 \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{x}{r}\right) & y < 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

Para a construção da imagem polar é necessário definir a sua origem ($PolarOrigin[0] = 0$, $PolarOrigin[1] = 0$), pixel inicial ($PolarStart[0] = 0$, $PolarStart[1] = 0$), espaçamento do pixel ($PolarSpacing[0] = spacing[0]$, $PolarSpacing[1] = spacing[0]$) e dimensão da imagem ($PolarSize[0] = \pi(size[0].spacing[0])$, $PolarSize[1] = size[0]/2$). Posteriormente, a imagem será povoada por pixels, que sofreram transformação do domínio cartesiano para o domínio polar, segundo a relação apresentada na Figura 6.11. O resultado do mapeamento da transformada polar na imagem *depthmap_corrected.vtk* resulta na imagem apresentada na Figura 6.12.

De seguida, é calculada a profundidade média da superfície ao longo do eixo angular (θ), de forma a obter-se um sinal uni-dimensional em função da distância radial. A evolução dos valores do raio e os respetivos valores de profundidade são armazenados num ficheiro de dados (*depthmap_profile_RZ.dat*), e posteriormente processados em Python para produzir o gráfico do sinal. O sinal uni-dimensional, que é apresentado na Figura 6.13 (a), designa-se Profundidade Média Radial (do inglês *Average Radial Height* (ARH)) [7]. Idealmente, a região *head* dos invólucros é constituída por 3 círculos concêntricos (Figura 3.10), que correspondem a mínimos

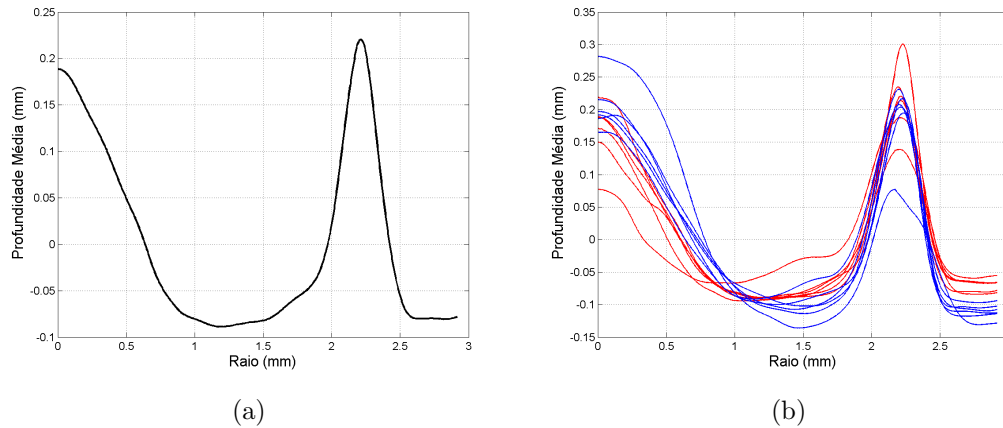


Fig. 6.13: Profundidade Média Radial. (a) 1 invólucro (Cid1); (b) 12 invólucros considerados (Cid1-Cid12). A vermelho- invólucros 1 até 6; A azul - invólucros 7 até 12.

locais do sinal. Tendo em conta este aspeto, e no sentido de determinar o valor radial correspondente ao círculo do primário, definiu-se inicialmente uma condição para detetar o valor máximo de profundidade no sinal ARH (Figura 6.13), para valores radiais superiores a 1,5 mm ($r > 1,5$). Este valor é obtido por análise do gráfico da Figura 6.13 (b), não se tratando de um valor crítico. Obtido o valor máximo de profundidade, é calculado o valor do raio correspondente, e esse valor fica armazenado numa variável (r_temp), que vai ser utilizado para calcular uma nova variável ($R1$), de tal forma que $R1 = 0.5 \times r_temp$. De seguida, o valor da variável $R1$ é subtraído ao valor da variável r_temp , e o resultado dessa operação origina a variável r_min . Por fim, é determinado o valor do raio (para $r > r_min$) para o qual, o valor de profundidade é 0. Com este valor radial, é possível definir os pontos (no domínio cartesiano) que definem a região do círculo do primário, e, a partir desse círculo, determinar as suas coordenadas centrais que em conjunto com o valor do raio do primário, permitem extrair uma região de interesse (ROI) da imagem *montage.vtk*. Para a conversão das coordenadas polares correspondentes ao raio (r) em coordenadas cartesianas ($C[0]$, $C[1]$) utilizaram-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned} C[0] &= r \cos \theta \\ C[1] &= r \sin \theta \end{aligned} \quad (6.4)$$

Os pontos obtidos desta transformação são armazenados num ficheiro de dados (*depthmap_points_XY.dat*) e posteriormente usados num ajuste de circunferência (círculo do primário), fornecendo assim as coordenadas do centro da região circular.

Estas coordenadas, em conjunto com o raio do primário, são armazenadas no ficheiro *depthmap_primer_circle.dat*.

6.2.4 Extração de Região de Interesse

O algoritmo de extração de região de interesse (ROI) desenvolvido no âmbito do presente trabalho, tem como objetivo definir uma região circular correspondente à região do primário, nos 30 invólucros considerados para o desenvolvimento de uma metodologia de identificação de armas de fogo. Para tal, o algoritmo desenvolvido tem como input as imagens *montage.vtk* e *depthmap_corrected.vtk* e o ficheiro *depthmap_primer_circle.dat*, obtido com recurso ao algoritmo de transformação polar. Para a extração da ROI, utilizou-se o filtro *Region Of Interest* do ITK, que requer uma região. A região é especificada por um índice, que indica o pixel onde a região se inicia (*Start_roi*), e por uma dimensão, que indica quantos pixels terá a região ao longo de cada dimensão [71]. Relativamente ao índice, este foi definido, tal como apresentado na seguinte equação:

$$\begin{aligned} start_roi[0] &= center[0] + roi_center[0] - roi_radius; \\ start_roi[1] &= center[1] + roi_center[1] - roi_radius, \end{aligned} \quad (6.5)$$

As variáveis *center[0]* e *center[1]* são as coordenadas do centro das imagens *montage.vtk* e *depthmap_corrected.vtk*, as variáveis *roi_center[0]* e *roi_center[1]* são as coordenadas do centro da região circular e *roi_radius* é o valor do raio da região circular do primário (*roi_radius* = 1,7 mm), definido de forma a eliminar a região circular do *Primer Pocket Gap* (ver Figura 3.10). Desta forma, garante-se que todas as ROIs circulares apresentam a mesma origem, independentemente das coordenadas obtidas a partir dos diferentes ficheiros de dados. Para se definirem as dimensões da ROI, foram definidas as seguintes instruções:

$$\begin{aligned} size_roi[0] &= roi_diameter / spacing[0] \\ size_roi[1] &= roi_diameter / spacing[1] \end{aligned} \quad (6.6)$$

Tendo em conta que *roi_diameter* é o dobro de *roi_radius* (1,7 mm), e o espaçamento nas direções x e y das imagens *montage.vtk* (20x) e *depthmap_corrected.vtk* (20x) é de aproximadamente 2,91 μm , a dimensão da ROI definida, é de 1168×1168 Pixels. Na Figura 6.14 é apresentado o esquema representativo para a extração de uma ROI, enquanto que na Figura 6.15 é apresentado o resultado da extração da

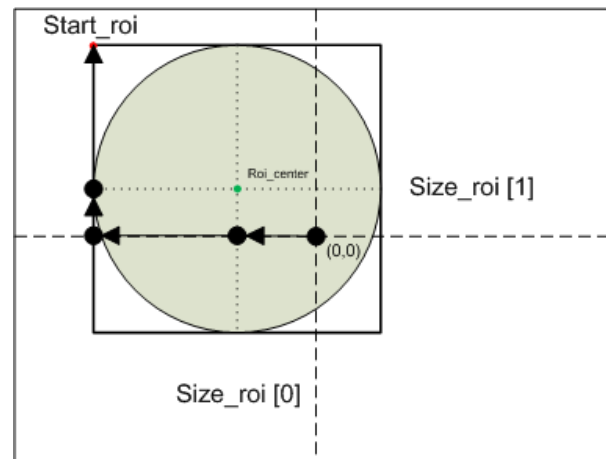


Fig. 6.14: Esquema representativo da extração de uma ROI.

região de interesse nas imagens de textura e mapa de profundidade.

6.3 Alinhamento de Imagens

O alinhamento de imagem é o processo que determina a correspondência pixel-a-pixel entre duas ou mais imagens, como por exemplo, imagens de invólucros recolhidos em cenas de crime [45]. As imagens são alinhadas, de forma a serem detetadas similaridades entre elas, que possam revelar por que arma a munição foi deflagrada. Com base na escolha dos diferentes elementos de alinhamento, referidos na subsecção 5.1.2 (alinhamento de imagem), os métodos de alinhamento e as suas aplicações podem ser classificadas de forma diferente e apresentar resultados distintos. Neste trabalho, utilizou-se a métrica *Normalized Correlation*, e, de forma a completar o algoritmo de alinhamento, foram definidos os restantes componentes básicos, para a transformação (*Euler 2D Transform*), interpolação (*Nearest Neighbor Interpolate Image Function*) e otimização (*Regular Step Gradient Descent Optimizer*). A funcionalidade de cada um destes componentes básicos é apresentada na secção 5.1.2. O algoritmo de alinhamento inicia-se após obtenção das regiões de interesse (ROIs) do primário, extraídas das imagens originais (como descrito na secção anterior), e translação destas para uma origem comum, de forma a obter-se círculos da região do primário concêntricos. Assim que um determinado par de ROIs esteja sobreposto, uma das imagens (imagem móvel) inicia o movimento de rotação, em passos de 6° . Para cada deslocamento angular, o componente de métrica regista um valor indicativo de similaridade entre as duas imagens. O valor de métrica obtido (pela Equação 6.7, onde A_i é o i -ésimo pixel da imagem A, B_i é o i -ésimo pixel da imagem B e

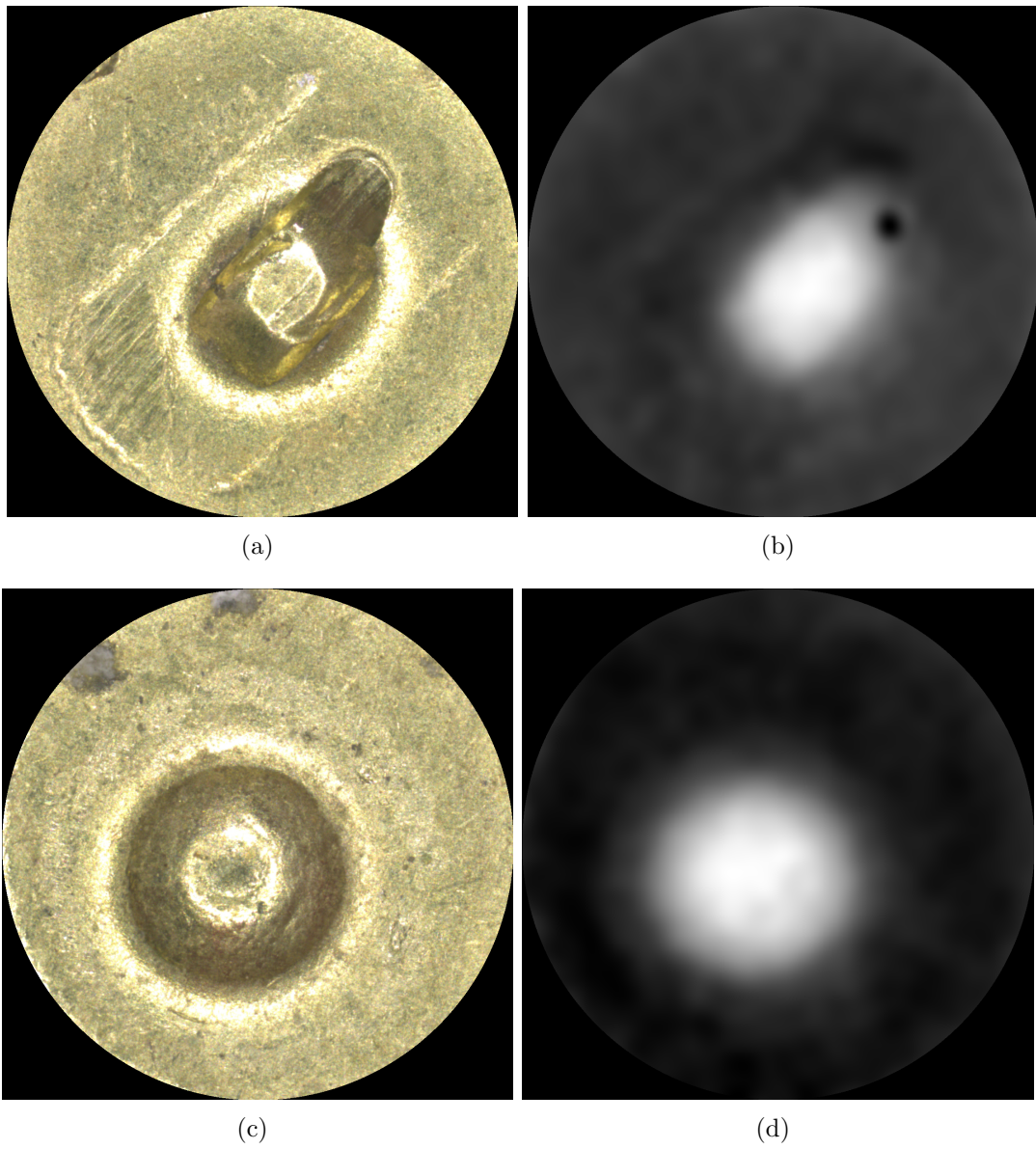


Fig. 6.15: Extração da região de interesse nas imagens de textura (montage) e mapa de profundidade (depthmap).

N é o número de pixels considerado) varia entre 0 e -1, sendo que 0 indica que as evidências são totalmente distintas e -1 indica que as evidências são iguais.

$$NC(A, B) = -1 \times \frac{\sum_{i=1}^N (A_i \cdot B_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2 \cdot \sum_{i=1}^N B_i^2}} \quad (6.7)$$

Do algoritmo de alinhamento resultam duas imagens e um ficheiro de dados, para cada par de ROIs sujeito ao alinhamento. No que respeita às imagens obtidas, a primeira (*diffBefore_cidA_cidB.png*) representa a sobreposição do par de ROIs, antes de ocorrer alinhamento, enquanto que a segunda (*diffAfter_cidA_cidB.png*) representa as ROIs sobrepostas, após rotação da imagem móvel de θ° , onde θ representa o ângulo de rotação para o qual o valor da métrica é mínimo. O ficheiro de dados (*NormalizedCorrelation_cidA_cidB.dat*), por sua vez, é constituído por duas colunas, onde são apresentados os valores do ângulo de rotação (de 0° até 360° , em passos de 6°) e as respetivas métricas. As imagens resultantes do algoritmo de alinhamento são apresentadas na Figura 6.16.

Com recurso ao ficheiro de dados, obtido à saída do algoritmo de alinhamento, seleccionou-se o valor mínimo de métrica e respetivo ângulo de rotação para cada par de invólucros sujeito ao alinhamento, e construiu-se um gráfico de dispersão (Figura 6.17) onde são apresentados 3 grupos, relativos à comparação entre invólucros deflagrados pela arma de fogo Glock 17, comparação entre invólucros deflagrados pela arma de fogo Walther P38 e comparação entre invólucros deflagrados pelas duas armas.

A fim de se construir uma representação relacional para o conjunto (N) de invólucros considerados para estudo, desenvolveu-se uma matriz $N \times N$, formada a partir da dissimilaridade [77] entre os pares de evidências (Figura 6.18). É importante referir que os 23 invólucros deflagrados pela arma de fogo Glock 17 ([1-6], [28-44]) correspondem na matriz ao conjunto de invólucros de [0-22], e os 7 invólucros deflagrados pela arma de fogo Walther P38, correspondem ao conjunto de invólucros definido de [23-30]. Após a análise da matriz, verifica-se que os invólucros deflagrados pela arma de fogo Walther P38 são muito similares, e se distinguem dos restantes.

De seguida, para o eixo dos invólucros móveis (CID (moving)), foram ordenados os valores das intensidades (Figura 6.19), do mais similar para o menos similar. Com base na matriz ordenada obtida, os valores das intensidades foram binarizados, de tal forma que, os pixels brancos representam os invólucros deflagrados pela arma

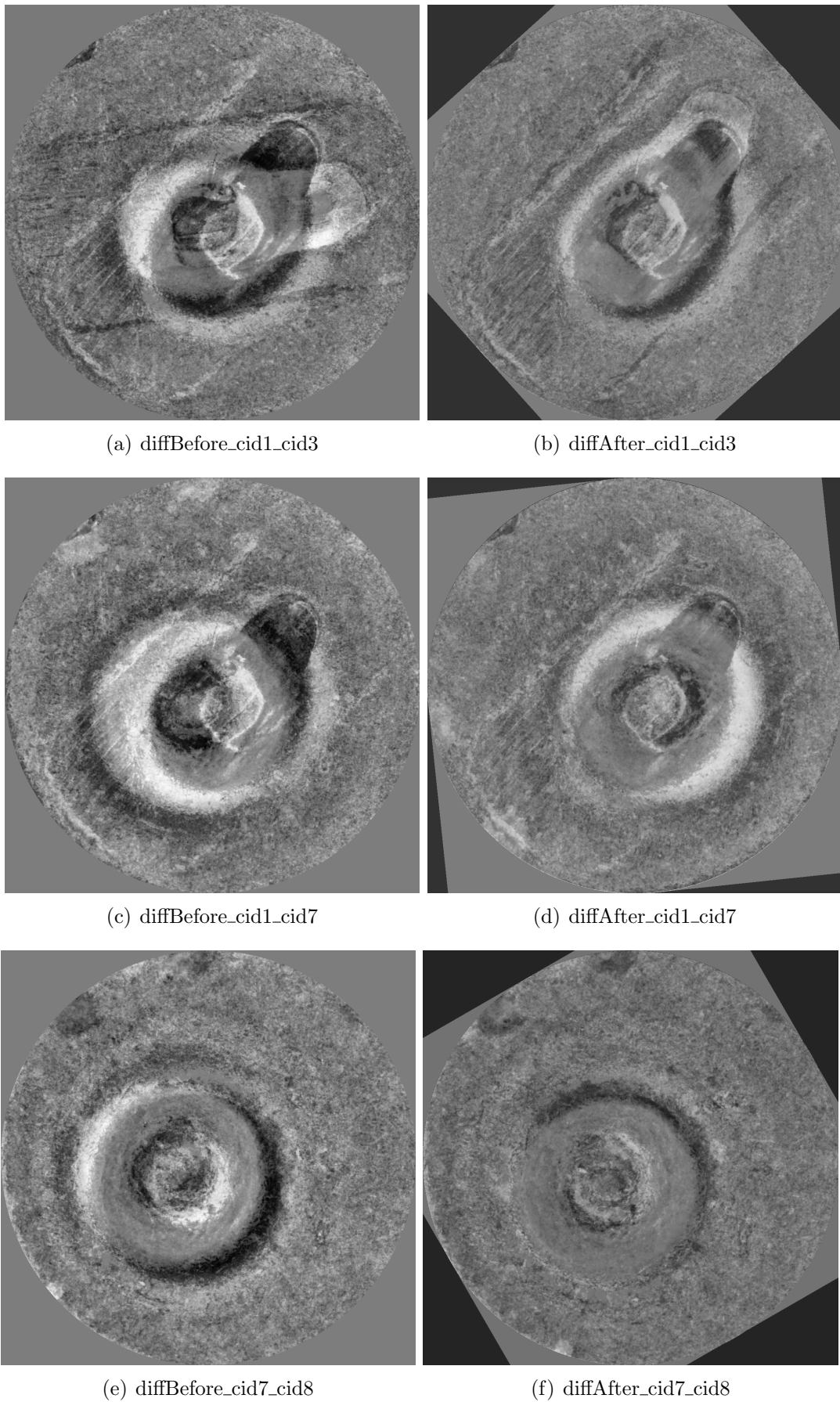


Fig. 6.16: Resultados do alinhamento de imagem com elemento de métrica *Normalized Correlation* para 3 pares de invólucros.

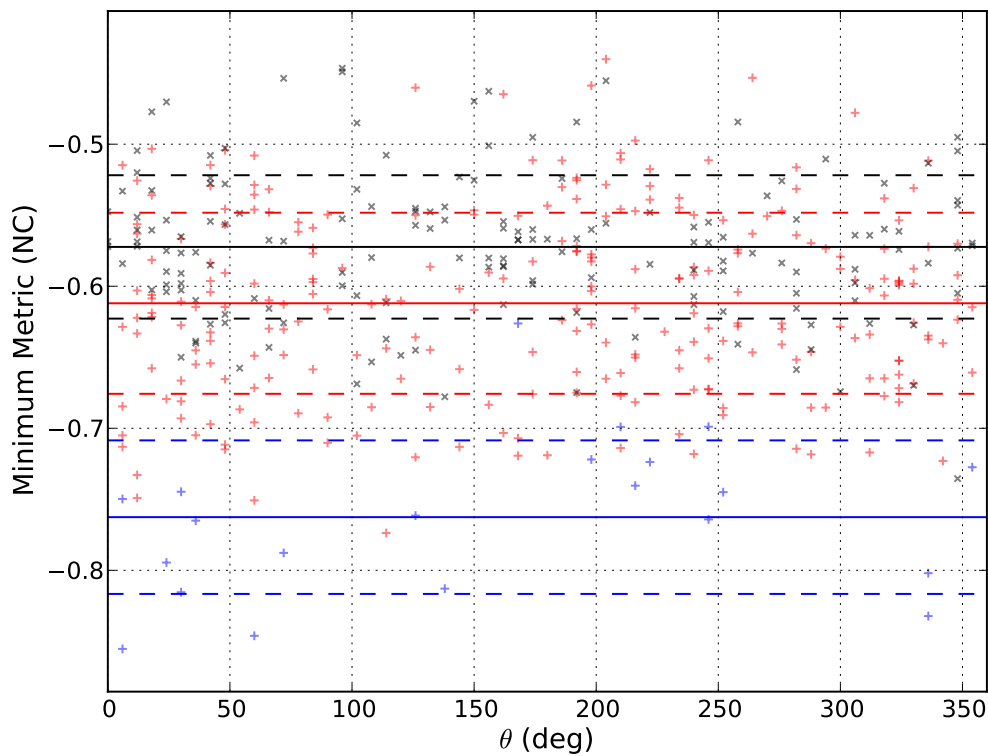


Fig. 6.17: Gráfico de dispersão para os valores mínimos da métrica e respectivo ângulo de rotação. Os pontos azuis representam os pares de invólucros deflagrados pela arma de fogo Walther P38, os pontos vermelhos representam os pares de invólucros deflagrados pela arma de fogo Glock 17 e os pontos pretos representam os pares invólucros deflagrados por ambas evidências.

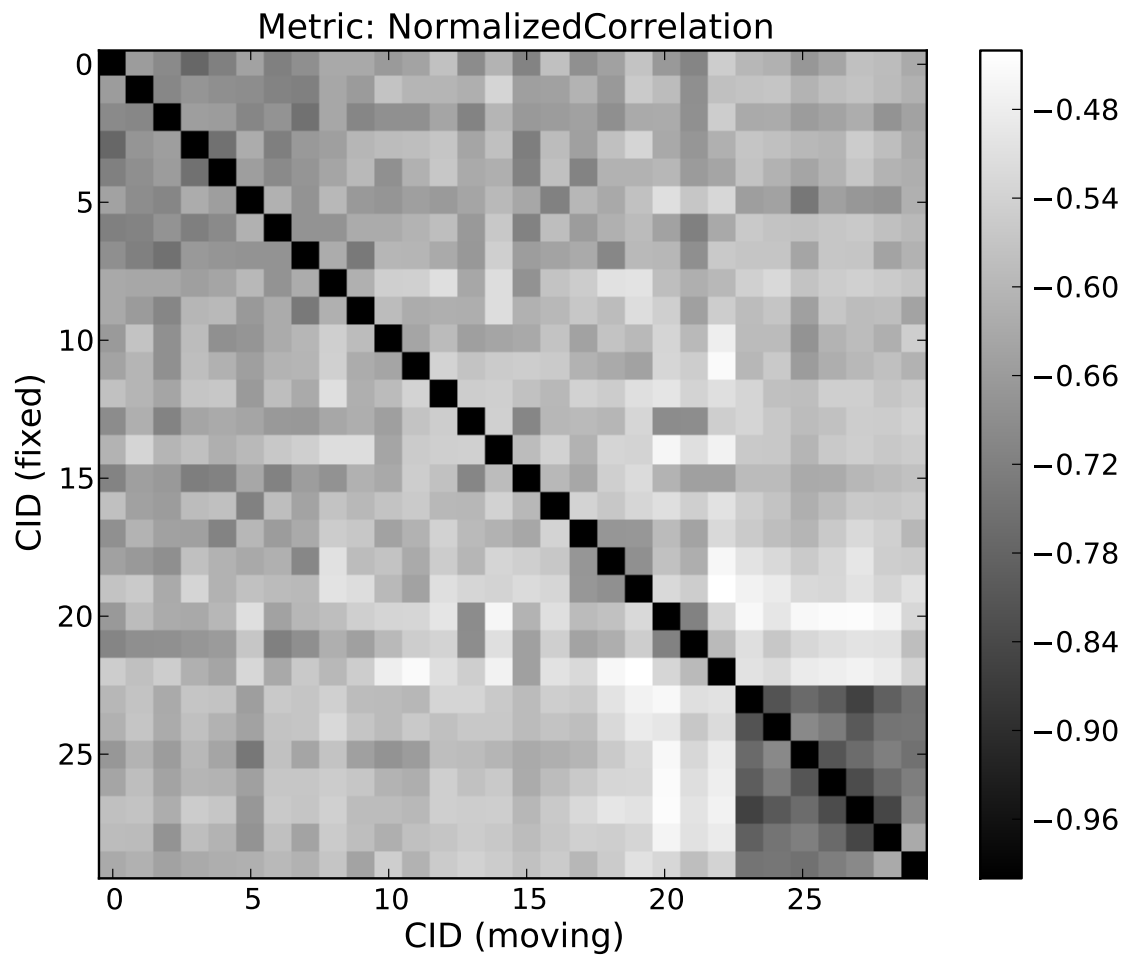


Fig. 6.18: Matriz com os resultados das métricas obtidos, com base no elemento de métrica *Normalized Correlation*.

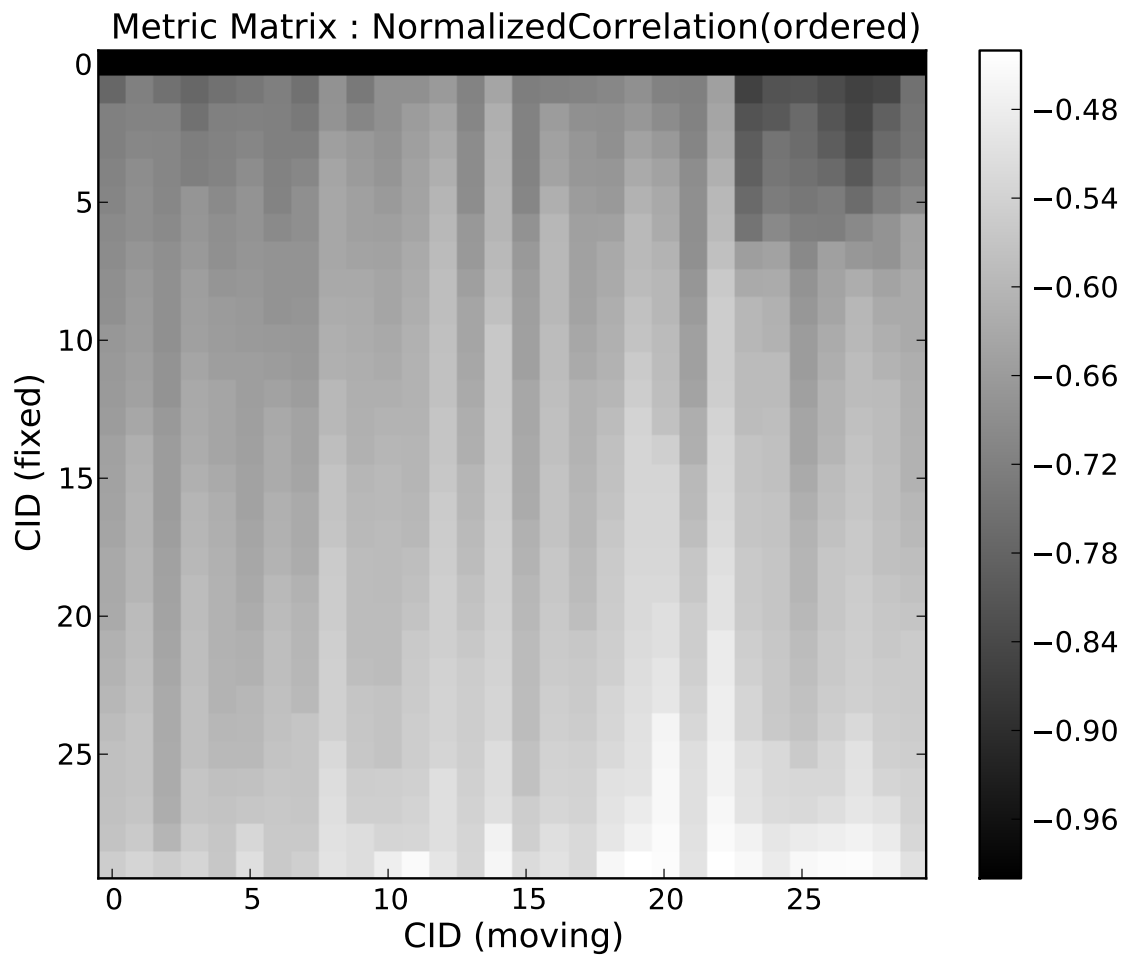


Fig. 6.19: Matriz com os resultados das métricas ordenadas, obtidos com base no elemento de métrica *Normalized Correlation*.

de fogo Walther P38, e os pixels pretos representam os invólucros deflagrados pela arma de fogo Glock 17. Com base na matriz binarizada obtida (Figura 6.20), conclui-se que o algoritmo de alinhamento desenvolvido apresenta-se como um sistema de apoio à decisão de grande fiabilidade pelo facto de determinar de forma correta a relação entre os invólucros deflagrados e a arma de fogo que os originou, à exceção do invólucro 5, que apresenta como invólucro mais semelhante, um invólucro deflagrado pela arma de fogo Walther P38.

6.3.1 Método semi-automático de comparação

O desenvolvimento de um método semi-automático para comparação de evidências, tem como principal objetivo, proporcionar ao utilizador uma ferramenta de interação com imagens de evidências, que visa esclarecer determinadas incoerências que possam advir tanto do processo de comparação manual como da comparação automática. Como referido na secção 4.4.3, o método de comparação manual de evidências balísticas, para além de demorado, revelou-se bastante complexo no que respeita à necessidade de centrar ambas as evidências. Assim, com base nas dificuldades presenciadas, desenvolveu-se um método semi-automático de comparação, com recurso às bibliotecas VTK que permite superar essas dificuldades. Para tal, foi utilizado um dos *widgets* do VTK disponíveis, o *Rectilinear Wipe Widget*. Este *widget* é utilizado em situações onde se pretende comparar duas imagens, e para a sua visualização, o utilizador pode optar por 7 modos de comparação distintos. O *Rectilinear Wipe Widget* assemelha-se a um xadrez (2×2), criado pela combinação de duas imagens separadas, sendo que este pode ser configurado da forma mais conveniente. Na Figura 6.21 são apresentadas algumas das configurações disponíveis que permitem interação com o utilizador, através do deslocamento do separador horizontal e vertical, de forma a visualizar as regiões pretendidas de cada imagem. Nas Figuras 6.22 e 6.23 são apresentados 2 exemplos de comparação pelo método semi-automático, entre evidências deflagradas pela arma de fogo *Glock 17* e *Walther P38*, respetivamente.

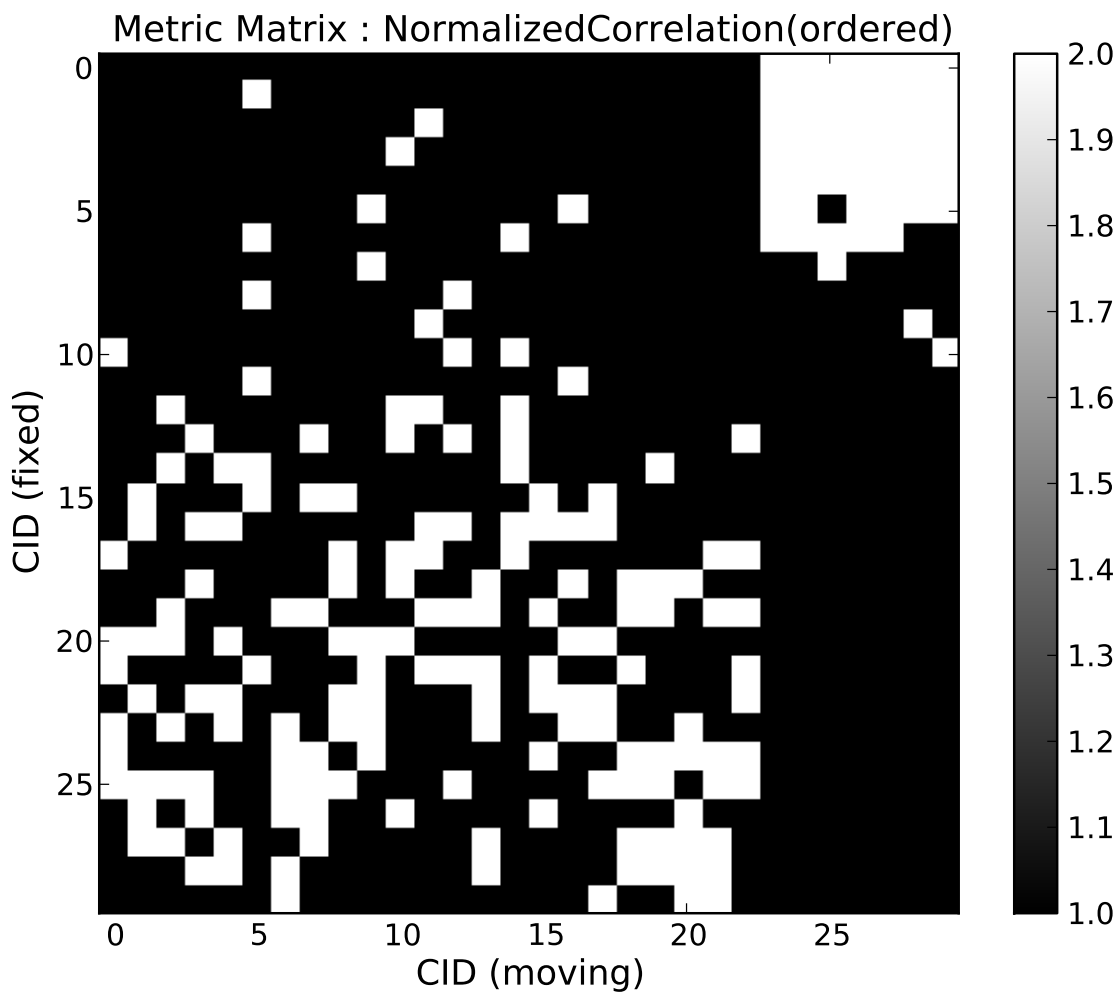


Fig. 6.20: Matriz com os resultados das métricas ordenadas e binarizadas, obtidas com base no elemento de métrica *Normalized Correlation*. Os pixels brancos representam os invólucros deflagrados pela arma de fogo Walther P38, enquanto que os pixels pretos representam os invólucros deflagrados pela arma de fogo Glock 17.

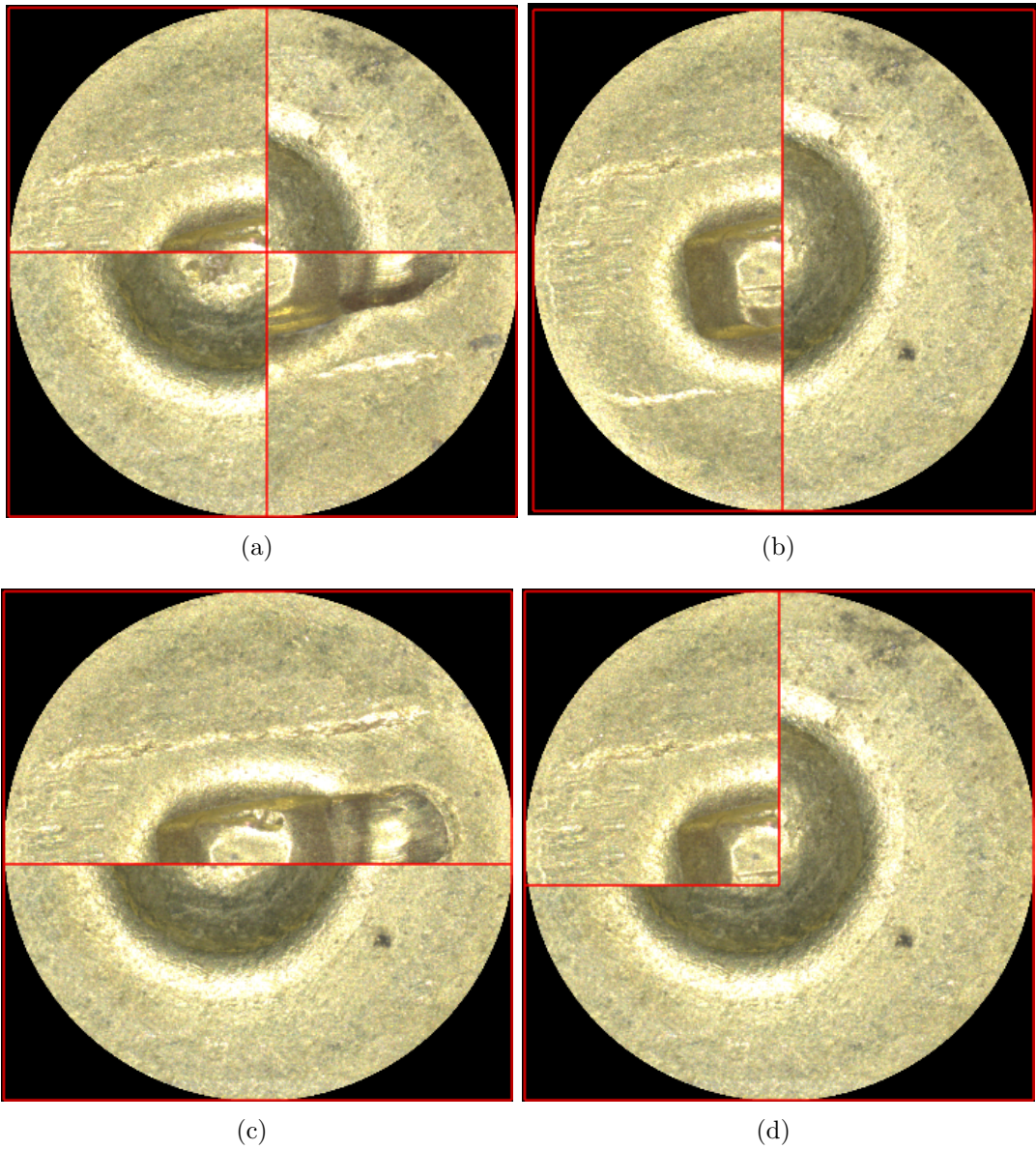


Fig. 6.21: Exemplos de configurações da janela de exibição do *Rectilinear Wipe Widget*.

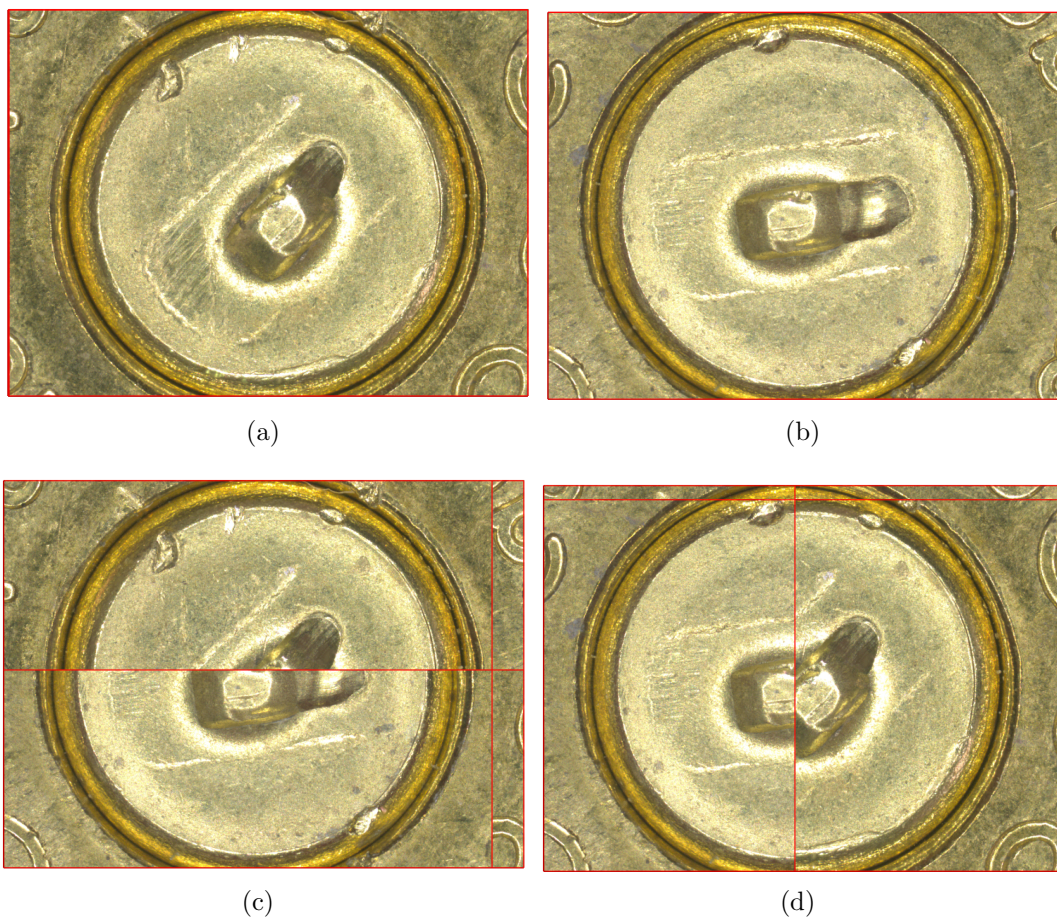


Fig. 6.22: Widgets cid1 e cid3. (a) Invólucro 1; (b) Invólucro 2; Comparação entre os invólucros 1 e 3 (c) com separador horizontal e (d) com separador vertical.

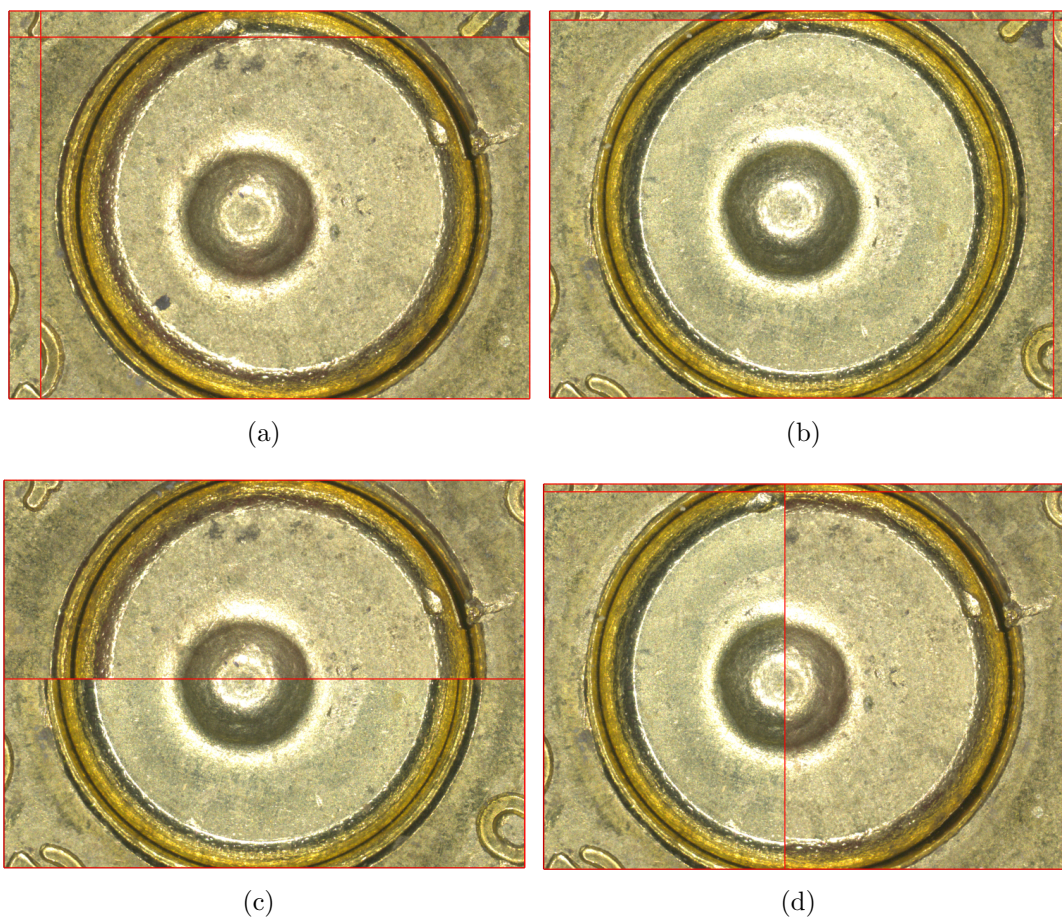


Fig. 6.23: Widgets cid8 e cid10. (a) Invólucro 8; (b) Invólucro 10; Comparação entre os invólucros 8 e 10 (c) com separador horizontal e (d) com separador vetical.

Conclusão

A importância das novas tecnologias aplicadas ao processamento de imagem e reconhecimento de padrões tem sido evidenciada pela sua crescente evolução nas últimas décadas. A sua aplicação é transversal a diversas áreas, nomeadamente na balística forense, em autopsias virtuais, no reconhecimento facial de pessoas em imagens de vídeo vigilância, identificação de pegadas, marcas de pneus e de impressões digitais e, ainda, no reconhecimento da autenticidade de assinaturas. A possibilidade de aplicação de técnicas de processamento e análise de imagem ao estudo de evidências balísticas revelou-se extremamente útil, ao permitir relacionar projéteis e invólucros disparados pela mesma arma e, eventualmente, dar uma contribuição fundamental para identificar o autor do disparo. Deste modo, esta tecnologia reveste-se de uma particular pertinência na área da criminalística. Uma vez que o método de comparação manual de evidências encontradas numa cena de crime, com evidências presentes numa base de dados é um método bastante demorado e implica um operador bem treinado e com larga experiência, torna-se portanto pertinente o desenvolvimento de técnicas que permitam automatizar todo o processo, tendo sido esse o principal objetivo da presente dissertação.

Neste trabalho foram desenvolvidos algoritmos de processamento de imagem, aplicados essencialmente a imagens obtidas a partir das modalidades *Planar* e *Multifocus*. No que respeita ao processamento de imagens planares em invólucros, foram desenvolvidos algoritmos que culminam na determinação, automática, do calibre da munição, entre outros parâmetros. Para tal, foi necessária a conversão e fusão dos formatos jpg (imagem) e xml (ficheiro auxiliar) no formato vtk, por se tratar de um formato mais conveniente. De seguida, as imagens RGB foram convertidas em tons de cinzento, de forma a permitir o funcionamento de um algoritmo de segmenta-

ção, da qual resulta um objeto branco, correspondente à região *head* do invólucro, num fundo preto. A partir da imagem segmentada, e com recurso ao algoritmo *Label Geometry*, é determinado o diâmetro equivalente da região circular obtida, correspondente ao calibre da munição. Os valores obtidos através deste método automático foram comparados com os valores obtidos com recurso ao paquímetro, no sentido de os validar.

Relativamente ao processamento de imagem em invólucros, obtidas a partir da modalidade *Multifocus*, foram desenvolvidos algoritmos que culminam na comparação automática de pares de invólucros, e determinação de uma métrica, indicativa do quão similares eles são. O primeiro algoritmo, à semelhança do que sucede na segmentação planar, faz a conversão e fusão dos formatos JPG (imagem) e XML (ficheiro auxiliar) no formato vtk, e simultaneamente, produz uma imagem tridimensional da superfície da região de interesse do invólucro, com base na junção de uma imagem de textura (*montage*) e um mapa de profundidade (*depthmap*). De seguida, e de forma a assegurar perpendicularidade da superfície da região do invólucro, procedeu-se à correção da sua inclinação, na imagem do mapa de profundidade. Com base na imagem corrigida, é determinado o perfil médio da superfície do invólucro, o qual permite extrapolar o diâmetro da região do primário e extrair uma região de interesse com base nesse valor. Com a extração da região de interesse relativa ao círculo do primário dos invólucros considerados, estabeleceu-se comparação entre todos. Tendo em conta que as evidências de 1 a 6 e de 28 a 44 foram deflagradas pela arma *Glock 17*, e as evidências de 7 a 12 deflagradas pela arma *Walther P38*, seria expectável que nas primeiras posições surgissem os invólucros deflagrados pela mesma arma que o invólucro considerado.

A exploração de técnicas de processamento e análise de imagens de evidências, obtidas através do microscópio ótico de comparação, tendo por base algoritmos computacionais, objeto de estudo desta dissertação, oferece inúmeras oportunidades para futuros desenvolvimentos. Isto sucede porque todos os esforços concebidos para melhorar o sistema de comparação de evidências vão ter um impacto positivo na resolução de casos de crime, constituindo uma ajuda adicional para o sistema de Justiça. Numa tentativa de evoluir o trabalho já realizado, poder-se-iam explorar as técnicas de processamento de imagem em projéteis, uma vez que o trabalho realizado centrou-se em processamento de imagem em invólucros deflagrados. Neste sentido, poder-se-iam criar modelos geométricos dos projéteis, com base em medições físicas e automáticas, e correlacionar as estrias presentes nos mesmos, no sentido de determinar se foram disparados pela mesma arma. Apesar da abordagem adotada

e implementada ao longo da presente dissertação ter produzido resultados interessantes e promissores, a mesma pode ser enriquecida e melhorada, nomeadamente, através da construção de uma estrutura personalizada para a iluminação, e do desenvolvimento de um protótipo mecânico para a modalidade de aquisição de imagem *Microscan*, uma vez que o suporte do microscópio ótico de comparação apresenta algumas limitações.

De forma a aumentar o número de evidências disponíveis para estudo, e consequentemente o tamanho da base de dados, poderiam ser estabelecidos contactos com forças policiais, de forma a serem recolhidos invólucros e projéteis resultantes das suas sessões de treino. Com o aumento da diversidade de evidências disponíveis, poderiam também ser desenvolvidas novas técnicas de classificação para os resultados do algoritmo de comparação automática.

Bibliografia

- [1] G. Gerules, S. Bhatia, D. Jackson, “A survey of image processing techniques and statistics for ballistic specimens in forensic science,” *Science and Justice*, vol. 53, pp. 236–250, July 2013.
- [2] P. Thumwarin, “An Automatic System for Firearm Identification,” tech. rep., Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology, Bangkok, 10520 Thailand, 2008.
- [3] D. Cork, J. Rolph, E. Meieran, C. Petrie, “Ballistics Imaging: Committee report on the feasibility, accuracy, and technical capability of a National Ballistics Database,” *Science and Justice*, vol. 51, pp. 83–87, 2011.
- [4] J. Song, T. Vorburger, S. Ballou, L. Ma, T. Renegar, “Traceability for ballistics signature measurements in forensic science,” *Measurement*, vol. 42, pp. 1433–1438, August 2009.
- [5] W. Chu, J. Song, T. Vorburger, J. Yen, “Pilot Study of Automated Bullet Signature - Identification Based on Topography Measurements and Correlations,” *Forensic Science International*, vol. 55, pp. 341–347, March 2010.
- [6] Forensic Technology, “IBIS TRAX HD 3D. Forensic Technology offers the world’s most advanced automated ballistic identification solution.,” tech. rep., 2013.
- [7] U. Sakarya, O. Topçu, U. Murat, M. Soysal, and E. Tunali, “Automated region segmentation on cartridge case base,” *Forensic Science International*, vol. 222, pp. 277–287, July 2012.
- [8] G. França, *Medicina Legal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, oitava ed., 2008.
- [9] R. Beran, “Analysis - What is legal medicine?,” *Journal of Forensic and Legal Medicine*, vol. 15, pp. 158–162, 2008.
- [10] T. Magalhães, “Introdução à Medicina Legal,” tech. rep., Faculdade de Medicina da Universidade do Porto, 2003.

- [11] J. Mennell, "The future of forensic and crime scene science Part II. A UK perspective on forensic science education," *Forensic Science International*, vol. 157, pp. 13–20, January 2006.
- [12] A. Jackson, J. Jackson, *Forensic Science*. Pearson Prentice Hall, second ed., 2008.
- [13] R. Beran, "What is legal medicine - Are legal and forensic medicine the same?," *Journal of Forensic and Legal Medicine*, vol. 17, pp. 137–139, 2010.
- [14] J. Mennell, I. Shaw, "The Future of Forensic and Crime Scene Science Part I. A UK forensic science user and provider perspective," *Forensic Science International*, vol. 157, pp. 7–12, January 2006.
- [15] F. Almeida, M. Paulino, *Profiling, Vitimologia e Ciências Forenses*, ch. 1. Pactor, Janeiro 2012.
- [16] Assembleia da República, "Decreto-Lei nº 166/2012 de 31 de Julho. Diário da República nº 147 - I Série. Ministério da Justiça. Aprova a orgânica do Instituto Nacional de Medicina Legal e Ciências Forenses, I. P.," Julho 2012.
- [17] Z. Geradts, J. Bijhold, "New developments in forensic image processing and pattern recognition," *Science and Justice*, vol. 41, pp. 159–166, April 2001.
- [18] B. Bachrach, "Ballistics Matching Using 3D Images of Bullets and Cartridge Cases: Project Summary." 2000.
- [19] Z. Geradts, J. Bijhold, R. Hermsen, "Pattern recognition in a database of cartridge cases," tech. rep., Netherlands Forensic Science Laboratory of the Ministry of Justice, 2288 GD Rijswijk, Netherlands, February 1999.
- [20] B. Bachrach, "A Statistical Validation of the Individuality of Guns Using 3D Images of Bullets," *National Institute of Justice*, pp. 1–67, March 2006.
- [21] M. Thali, K. Yen, P. Vock, C. Ozdoba, B. Kneubuehl, M. Sonnenschein, R. Dirnhofer, "Image-guided virtual autopsy findings of gunshot victims performed with multi-slice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI) and subsequent correlation between radiology and autopsy findings," *Forensic Science International*, vol. 138, pp. 8–16, May 2003.
- [22] M. Thali, C. Jackowski, L. Oesterhelweg, S. Ross, R. Dirnhofer, "VIRTOPSY - The Swiss virtual autopsy approach," *Legal Medicine*, vol. 9, pp. 100–104, 2007.
- [23] Z. Geradts, *Content Based Information Retrieval in Forensic Image Databases*. PhD thesis, University of Utrecht, Volmerlaan 17 2288 GD Rijswijk, Netherlands, December 2001.

- [24] A. Khireddine, K. Benmahammed, W. Puech, "Digital image restoration by Wiener filter in 2D case," *Advances in Engineering Software*, vol. 38, pp. 513–516, February 2007.
- [25] D. Noll, "Restoration of Degraded Images with Maximum Entropy," *Global Optimization*, vol. 10, pp. 91–103, 1997.
- [26] R. Liu, Z. Lin, W. Zhang, K. Tang, Z. Su, "Toward designing intelligent PDEs for computer vision: An optimal control approach," *Image and Vision Computing*, vol. 31, pp. 43–156, 2013.
- [27] F. Prokoski, "Use of Infrared Imaging, a Robust Matching Engine, and Associated Algorithms to Enhance Identification of Both 2D and 3D Impressions." August 2009.
- [28] M. Liu, P. Yap, "Invariant representation of orientation fields for fingerprint indexing," *Pattern Recognition*, vol. 45, pp. 2352–2542, January 2012.
- [29] K. Moses, P. Higgins, M. McCabe, S. Prabhakar, S. Swann, *Automated Fingerprint Identification System (AFIS)*, ch. 6, pp. 1–33. National Institute of Justice, August 2011.
- [30] K. Franke, M. Koppen, "A computer-based system to support forensic studies on handwritten documents," *International Journal on Document Analysis and Recognition manuscript*, vol. 3, pp. 218–231, 2001.
- [31] X. Zhang, C. Liu, "Evaluation of weighted Fisher criteria for large category dimensionality reduction in application to Chinese handwriting recognition," *Pattern Recognition*, vol. 46, pp. 2599–2611, February 2013.
- [32] E. Nel, J. Preez, B. Herbst, "Verification of dynamic curves extracted from static handwritten scripts," *Pattern Recognition*, vol. 41, pp. 3773–3785, May 2008.
- [33] M. Kaplan, O. Geling, "Firearm suicides and homicides in the united states: Regional variations and patterns of gun ownership," *Social Science and Medicine*, vol. 46, pp. 1227–1233, 1998.
- [34] M. Liem, C. Barber, N. Markwalder, M. Killias, P. Nieuwbeerta, "Homicide-suicide and other violent deaths: An international comparison," *Forensic Science International*, vol. 207, pp. 70–76, 2011.
- [35] G. Duarte, "O papel da ciência forense na investigação dos crimes de homicídio," Master's thesis, Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, 2009.
- [36] D. Volgas, J. Stannard, J. Alonso, "Ballistics: a primer for the surgeon," *International Journal of the Care of the Injured*, vol. 36, pp. 373–379, 2005.

- [37] M. Tokdemir, H. Kafadar, A. Turkoglu, T. Bork, "Forensic value of gunpowder tattooing in identification of multiple entrance wounds from one bullet," *Legal Medicine*, vol. 9, pp. 147–150, 2007.
- [38] C. Bono, R. Heary, "Gunshot wounds to the spine," *The Spine Journal*, vol. 4, pp. 230–240, 2004.
- [39] A. Pinto, L. Brunese, M. Scaglione, M. Scudei, L. Romano, "Gunshot Injuries in the Neck Area: Ballistics Elements and Forensic Issues," *Seminars in Ultrasound CT and MRI*, vol. 30, pp. 215–220, 2009.
- [40] R. Santucci, Y. Ghang, "Ballistics for physicians: Myths about Wound Ballistics and Gunshot Injuries," *The Journal of Urology*, vol. 171, pp. 1408–1414, April 2004.
- [41] A. Santos, "Lesões e mecanismos lesionais," tech. rep., Faculdade de Medicina da Universidade do Porto, Delegação do Norte do Instituto Nacional de Medicina Legal. I.P., Setembro 2008.
- [42] M. Page, J. Taylor, M. Blenkin, "Uniqueness in the forensic identification sciences-Fact or fiction?," *Forensic Science International*, vol. 206, pp. 12–18, 2011.
- [43] ISO 17025, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories," 2005.
- [44] J. Song, T. Vorburger, S. Ballou, R. Thompson, J. Yen, T. Renegar, "The National Ballistics Imaging Comparison (NBIC) project," *Forensic Science International*, vol. 216, pp. 168–182, 2012.
- [45] W. Chu, L. Ma, J. Song, T. Vorburger, "An Iterative Image Registration Algorithm by Optimizing Similarity Measurement," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 115, pp. 1–6, January-February 2010.
- [46] J. Song, T. Vorburger, L. Ma, J. Libert, S. Ballou, "A Metric for the Comparison of Surface Topographies of Standard Reference Material (SRM) Bullets and Casings," tech. rep., National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD 20899, October 2005.
- [47] J. Ceuster, R. Hermsen, M. Mastaglio, R. Nennstiel, "A discussion on the usefulness of a shared European ballistic image database," *Science and Justice*, vol. 52, pp. 213–242, 2012.
- [48] Interpol, *Interpol Ballistic Information Network. Handbook on the collection and sharing of ballistic data*. Forensic Technology, second ed., 2012.
- [49] INTERPOL, "Connecting police: I-24/7," tech. rep., INTERPOL, 2011.

- [50] J. Leng, Z. Huang, "On analysis of circle moments and texture features for cartridge image recognition," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, pp. 2092–2101, 2012.
- [51] D. Li, "Ballistics Projectile Image Analysis for Firearm Identification," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 15, pp. 2857–2865, October 2006.
- [52] N. Ghani, C. Liong, A. Jemain, "Analysis of geometric moments as features for firearm identification," *Forensic Science International*, vol. 198, pp. 143–149, March 2010.
- [53] Z. Feng, M. Luo, S. Chang, L. Yang, J. Kong, "Automatic Cartridge Case Image Mosaic Using SIFT and Graph Transformation Matching," *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 371–375, 2009.
- [54] P. Thumwarin, C. Prasit, P. Boonbumroong, T. Matsuura, "Firearm Identification based on FIR System Characterizing Rotation Invariant Feature of Cartridge Case Image," tech. rep., Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology, 2008.
- [55] S. Yammen, P. Muneesawang, "Cartridge case image matching using effective correlation area based method," *Forensic Science International*, vol. 229, pp. 27–42, 2013.
- [56] M. Bonfanti, J. Kinder, "The influence of manufacturing processes on the identification of bullets and cartridge cases - a review of the literature," *Science and Justice*, vol. 39, pp. 3–10, 1999.
- [57] Assembleia da República, "Decreto-Lei n° 12/2011 de 27 de Abril. Diário da República n° 81 - I Série. Objeto, âmbito, definições legais e classificação das armas," Abril 2011.
- [58] B. Heard, *Handbook of firearms and ballistics: examining and interpreting forensic evidence*. John Wiley and Sons, Ltd, second ed., 2008.
- [59] F. Barnes, *Cartridges of the World*. DBI Books, 8 ed., 1997.
- [60] V. Maio, *Gunshot Wounds: Practical Aspects of Firearms, Ballistics, and Forensic Techniques*. Vernon Geberth, second ed., 1999.
- [61] J. Kinder, F. Tulleners, H. Thiebaut, "Reference ballistic imaging database performance," *Forensic Science International*, vol. 140, pp. 207–215, 2004.
- [62] P. Smet, R. Hermsen, B. Leuven, J. Kinder, K. Hoffmann, "Experimental evaluation of the impact of seating depth variations on observed marks on primers," *Forensic Science International*, vol. 179, pp. 163–171, 2008.

- [63] W. Chu, J. Song, T. Vorburger, and S. Ballou, "Striation Density for Predicting the Identifiability of Fired Bullets with Automated Inspection Systems," *J Forensic Sciences*, vol. 55, pp. 1222–1226, September 2010.
- [64] J. Kumar, D. Landheer, J. Warden, P. Fenne, A. Attridge, M. Williams, "Inconsistency in 9 mm bullets measured with non-destructive X-ray computed tomography," *Forensic Science International*, vol. 214, pp. 48–58, August 2012.
- [65] C. Zeiss, "Applications of Scanning Eletron Microscopes in Forensic Investigations by Carl Zeiss," tech. rep., Carl-Zeiss-Promenade 10, Jena, 07745 Germany, November 2010.
- [66] U. Sakarya, U. Legoglu, E. Tunal, "Three-dimensional surface reconstruction for cartridge cases using photometric stereo," *Forensic Science International*, vol. 175, pp. 209–217, 2008.
- [67] Leica Microsystems, *LAS User Manual*. CH 9435 Heerbrug, Switzerland: Leica Microsystems, October 2011.
- [68] F. León, "Enhanced imaging by fusion of illumination series." June 1997.
- [69] L. Microsystems, "Leica application suite - montage module," 2005.
- [70] F. Tulleners, "Technical Evaluation: Feasibility of a Ballistics Imaging Database for all new Handgun Sales." October 2001.
- [71] L. Ibáñez, W. Schroeder, L. Ng, and J. Cates, *The ITK Software Guide*. Kitware, second ed., November 2005.
- [72] F. Jacob, "Alinhamento de Estruturas em Imagens Médicas: Estudo, Desenvolvimento e Aplicação," Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho 2010.
- [73] R. Beare, "Optimization of connected component labeling," tech. rep., Department of Medicine, Monash University, Australia, March 2006.
- [74] D. Padfield, J. Miller, "A Label Geometry Image Filter for Multiple Object Measurement," tech. rep., GE Global Research, Niskayuna, New York, September 2008.
- [75] J. Bican, "Polar Transforms for ITK," tech. rep., Institute of Information Theory and Automation, January 2007.
- [76] R. Matungka, Y. Zheng, R. Ewing, "Image Registration Using Adaptive Polar Transform," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, pp. 2340–2354, October 2009.
- [77] P. Paclík, R. Duin, "Dissimilarity-based classification of spectra: computational issues," *Real-Time Imaging*, vol. 9, pp. 237–244, 2003.