#### Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

## Desenvolvimento de um sistema automatizado para captura e comparação de estriamentos de projéteis de armas de fogo

## João Bosco Silvino Júnior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Guilherme Augusto Silva Pereira

Belo Horizonte, Março de 2010

Dedico esta dissertação ao Todo Poderoso Senhor Jesus Cristo, a quem deve ser dada toda a honra e toda a glória. ii

# Resumo

O crescente uso de armas de fogo na prática de crimes tem sido uma preocupação constante dos órgãos de investigação policial. A detecção de crimes relacionados entre si é uma ferramenta poderosa que pode ser decisiva no desvendamento de uma ação delitiva. O desenvolvimento de um sistema capaz de detectar o uso de uma mesma arma em crimes diferentes torna-se uma necessidade para os órgãos de polícia técnico-científica, pois abre um novo leque de informações que antes não era possível, dada a complexidade e demora nos processos de confronto balístico.

Este trabalho apresenta-se como o início do desenvolvimento de um equipamento com tecnologia nacional para a microcomparação balística automática de projéteis. Nele é apresentado o mecanismo de aquisição da imagem do projétil, uma metodologia de montagem desta imagem e também de comparação entre os microestriamentos, determinando o grau de semelhança entre as amostras colhidas utilizando a Função de Correlação Cruzada (FCC).

Os principais resultados alcançados foram a captura e a montagem da imagem da área lateral de um objeto tridimensional e comparação das imagens das amostras adquiridas. Estas comparações permitiram determinar quais amostras foram produzidas pela mesma arma. Espera-se, com o desenvolvimento futuro deste trabalho, que possa ser produzida uma solução brasileira para a microcomparação balística automática e busca de casos relacionados em um banco de dados. iv

# Abstract

The increasing use of guns in crimes has been a constant worrying to the law enforcemen and the need of capable information in order to get a solution for those crimes is evident. The detection of correlative previous crimes becomes a powerful tool that can be decisive to the solution of a criminal action. The creation of a proper system that is able to detect the use of the same gun on different crimes becomes a huge need for the techno-scientific policy institutes and it opens a wide range of information that wasn't possible before due to de complexity in ballistic comparishion processes, that envolves the ballistics examiner to indivually analyze each speciment.

This work introduces a beginning in the development of equipment with national technology for automatic ballistic projects comparison. It is introduced the mechanism of image acquisition of the projectile, a methodology of the set up of this image and the comparisons among the micro striation marks, and determining the similarity level among picked samples using Cross Correlation Function (CCF)

The most important results were the capture and the set up of the lateral area image of a three-dimensional object as well the comparison of acquired sample images. These comparisons allowed to determine what samples were produced by the same gun. It is expected, with the future development of the present work, it can be produced national solutions for the automatic ballistic comparisons, by searching related facts in appropriated databases. vi

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Nosso Senhor Jesus Cristo, Senhor, Guia e meu salvador, em quem confio e deposito todas as minhas esperanças e aspirações.

Ao meu Orientador, Amigo e Professor Guilherme Augusto Pereira, o meu MUITO OBRIGADO pela paciência, orientação, transmissão de conhecimento, boa vontade e parceria nessa jornada.

Agradeço à minha mãe, Ivone, pelas inúmeras lições de português, inglês e, principalmente, vida. Ao meu pai, João Bosco, pelo incentivo à busca do conhecimento, evolução e sabedoria. À minha esposa Roberta pelo companheirismo, compreensão, por ser a inspiração da minha vida em todos os momentos. Aos meus irmãos, Marcelo e Paulo, fiéis amigos, escudeiros e apoiadores das minhas decisões. Fico honrado em ter todos vocês em minha vida. Sem vocês o trabalho não seria possível.

Agradeço também à família da minha esposa, Raimundo, Helena, Lisandro, Cláudio, Regiane, Vitor e Guilia, que carinhosamente me acolheram.

A minha avó Luiza, *in memorian*, por sempre estar ao meu lado, agradeço por me tornar uma pessoa melhor.

Faço também os meus agradecimentos à Invent Vision, empresa inovadora na área de visão computacional, parceira e grande colaboradora, nas pessoas de Luiz Fernando, Fernanda e Édila, que com muito carinho e atenção suportaram as minhas diversas investidas à procura de apoio.

Presto a minha gratidão aos diversos amigos conquistados durante a ca-

minhada: Arlindo, Thiago Arreguy, Marco Antônio, Michele, Danilo, Marco Aurélio, Mateus e demais colegas do CORO, e também aos amigos antigos, dos quais não poderia me esquecer, tais como os Sparros, pelo apoio durante a graduação; Hudson e Professor Elder, pelas agradáveis conversas; Professor Hani e Professor Selênio pelo exemplo a seguir; e à Anete e Arlete pelo grande carinho que tratam os alunos e pelo cuidado dispensado nos assuntos administrativos.

Também não poderia deixar de agradecer aos colegas do Instituto de Criminalística, encabeçados pelo meu amigo, Mestre e tutor Sérgio Márcio Costa Ribeiro, Serjão, que sempre me incentivou e apoiou na minha carreira de Perito Criminal.

Aos meus amigos, parentes e colegas agradeço mais essa conquista.

# Sumário

Li	sta d	le Figuras	xi
1	Intr	oducão	1
	1.1	Motivação	5
	1.2	Objetivos	9
	1.3	Sistema proposto e Contribuições	10
	1.4	Organização da Dissertação	10
<b>2</b>	Rev	risão de Literatura	13
	2.1	Processo de produção de canos de armas de fogo de alma raiada	14
	2.2	Comparação balística de projéteis	16
	2.3	Trabalhos já publicados	19
	2.4	Proposta do trabalho	24
3	Cap	otura da Imagem e Extração do Sinal	25
	3.1	Escolha da câmera	26
	3.2	Escolha do mecanismo de giro do projétil	27
	3.3	Determinação dos pontos de referência e união das imagens	28
		3.3.1 Scalar Invariant Feature Transform - SIFT	29
	3.4	Extração do sinal a partir da imagem obtida	36
4	Con	nparação de Sinais Utilizando a Função de Correlação	
	Cru	Izada	41
<b>5</b>	$\operatorname{Res}$	ultados Experimentais	51
	5.1	Resultado da captura das imagens dos projéteis	51
	5.2	Resultados das análises das correlações	58
		5.2.1 Arma I	59
		5.2.2 Arma II	60
		5.2.3 Arma III	61
		5.2.4 Arma IV	63

		5.2.5	Arma V	64
		5.2.6	Arma VI	65
		5.2.7	Arma VII	66
	5.3	Result	ados de comparações entre amostras de armas diferentes	74
		5.3.1	Amostra 2 da arma VI comparada com a amostra 1 da arma III	74
		5.3.2	Amostra 2 da arma V comparada com a amostra 1 da arma VII	75
		5.3.3	Amostra 1 da arma III comparada com a amostra 2 da	70
		594	arma I	76
		5.3.4	Amostra 1 da arma 1 comparada com a amostra 2 da arma II	77
		5.3.5	Amostra 1 da arma IV comparada com a amostra 2 da	70
		536	Amostra 2 da arma V comparada com a amostra 1 da	10
		0.0.0	arma VI	79
		5.3.7	Amostra 1 da arma VI comparada com a amostra 1 da	20
		5.3.8	Amostra 2 da arma IV comparada com a amostra 1 da	80
			arma III	81
		5.3.9	Amostra 1 da arma VII comparada com a amostra 2 $$	
			da arma I	82
		5.3.10	Amostra 1 da arma VII comparada com a amostra 2	0.0
	۲ 4	D'	$\begin{array}{c} \text{da arma V1} \\   \\  \\  \\  \\   \\ $	82
	5.4	Discus	sao dos resultados	95
6	Con	nclusõe	s e Trabalhos Futuros	97

# Lista de Figuras

1.1	Armas primitivas e medievais desenvolvidas para a caça e para a guerra [Rabello, 1995].	2
1.2	Algumas das primeiras armas de fogo desenvolvidas pelo ho- mom [Martinoz 1997]	2 2
1.3	Fotocomparador de Belaunde, uma das primeiras máquinas destinadas à captura da imagem dos estriamentos dos projéteis propelidos por armas de alma raiada [Rabello, 1995]	5
1.4	Estriágrafo desenvolvido por John E. Davis para obter o perfil das estrias de projéteis propelidos por armas de fogo de alma raiada [Rabello, 1995].	6
1.5	Microcomparador balístico Leica utilizado no Laboratório de Balística do Instituto de Criminalística da Polícia Civil de Mi- nas Gerais, semelhante aos utilizados em outros estados	7
1.6	Topologia proposta para um sistema automatizado de cap- tura e armazenamento de amostra de projéteis para confronto balístico	9
2.1	Fotografia mostrando o interior do cano de uma arma de alma raiada	15
2.2	Microcomparação balística entre dois projéteis de calibre .32 S&WL. A linha esfumaçada divide o projétil questionado do projétil padrão, mostrando também a coincidência entre os	
	estriamentos dos mesmos [Tocchetto, 2005]	17
3.1	Fluxograma para captura da imagem da área lateral do projétil.	26
3.2	Hardware utilizado na captura das imagens dos projéteis	28
3.3	Determinação do fluxo optíco de uma imagem	29
3.4	Filtro de Diferença da Gaussiana para aplicação da transfor- mada SIFT	30
3.5	Verificação da estabilidade dos pontos-chave	31

3.6	Construção dos pontos-chave com a avaliação do gradiente da	
	imagem em torno dos mesmos	32
3.7	Definição dos pontos-chave e escolha do ponto de referência	
	para a fusão das imagens.	33
3.8	Corte nos pontos de referência e concatenação das imagens	34
3.9	Resultado da fusão das imagens	34
3.10	Avaliação da confiabilidade do ponto chave escolhido	35
3.11	Sinal obtido a partir da intensidade de cinza de uma linha de pixels paralela ao comprimento da imagem do projétil	36
3.12	Sinal obtido a partir da média da intensidade de cinza de uma	
	faixa de pixels paralela ao comprimento da imagem do projétil.	38
3.13	Comparação entre os sinais obtidos a partir da linha e da faixa	
	de pixels paralelas ao comprimento da imagem	39
3.14	Campos utilizados nas comparações entre os projéteis	39
11	FAC de singl integre obtide a partir de imagem de projétil	11
4.1 4.2	Sinal íntegro e FFT do sinal íntegro	14
4.3	Filtro Butterwort passa-baixas de primeira ordem e compo-	1.1
1.0	nentes de baixas-frequências do sinal.	15
4.4	Filtro Butterwort passa-altas de primeira ordem e componen-	
	tes de altas-frequências do sinal	15
4.5	Sinais obtidos a partir das baixas e altas frequências dos sinais.	16
4.6	FAC do sinal íntegro obtido a partir da imagem do projétil,	
	bem como das componentes em baixas e altas frequências deste	
	sinal	17
4.7	Resultado da função de correlação cruzada entre dois campos	
	diferentes do mesmo projétil	17
51	Projétil 1 colhido da arma I	52
5.2	Projétil 2 colhido da arma I	52 52
5.3	Projétil 1 colhido da arma II	52 53
5.4	Projétil 2 colhido da arma II	53
5.5	Projétil 1 colhido da arma III.	54
5.6	Projétil 2 colhido da arma III.	54
5.7	Projétil 1 colhido da arma IV	54
5.8	Projétil 2 colhido da arma IV	55
5.9	Projétil 1 colhido da arma V	55
5.10	Projétil 2 colhido da arma V	55
5.11	Projétil 1 colhido da arma VI	56
5.12	Projétil 2 colhido da arma VI	56
5.13	Projétil 1 colhido da arma VII.	56

$5.14 \\ 5.15$	Projétil 2 colhido da arma VII	57
	da Arma I	60
$5.16 \\ 5.17$	Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma I Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas	61
	da Arma II.	62
5.18	Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma II	63
5.19	Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas da Arma III	64
5 20	Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma III	65
5.20	Bosultado das anólisos do correlação para as amostras colhidas	00
0.21	da Arma IV	66
5 99	Comparação vigual entre as amostras colhidas da Arma IV	67
5.92	Posultado das apólicos de correlação para as amostras colhidas	07
0.20	de Arme V	68
5.94	Comparação vigual entre as amostras colhidas de Arma V	60
5.24	Posultado das apólicos de correlação para as amostras colhidas	09
5.25	da Arma VI	70
5 26	Comparação visual ontro as amostras colhidas da Arma VI	70
5.20	Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas	11
0.21	da Arma VII	72
5 28	Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma VII	73
5.20	Besultado das análises de correlação para a amostra 2 da arma	10
0.20	VI comparada com a amostra 1 da arma III.	75
5.30	Comparação visual entre a amostra 2 da arma VI e a amostra	
0.00	1 da arma III.	76
5.31	Resultado das análises de correlação para a amostra 2 da arma	
	V comparada com a amostra 1 da arma VII	77
5.32	Comparação visual entre a amostra 2 da arma V e a amostra	
	1 da arma VII.	78
5.33	Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma	
	III comparada com a amostra 2 da arma I	79
5.34	Comparação visual entre a amostra 1 da arma III e a amostra	
	2 da arma I	80
5.35	Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma	
	I comparada com a amostra 2 da arma II	81
5.36	Comparação visual entre a amostra 1 da arma I e a amostra	
	2 da arma II	82
5.37	Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma	
	IV comparada com a amostra 2 da arma VII	83

Comparação visual entre a amostra 1 da arma IV e a amostra	
2 da arma VII	84
Resultado das análises de correlação para a amostra 2 da arma	
V comparada com a amostra 1 da arma VI	85
Comparação visual entre a amostra 2 da arma V e a amostra	
1 da arma VI	86
Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma	
VI comparada com a amostra 1 da arma III	87
Comparação visual entre a amostra 1 da arma VI e a amostra	
1 da arma III	88
Resultado das análises de correlação para a amostra 2 da arma	
IV comparada com a amostra 1 da arma III	89
Comparação visual entre a amostra 2 da arma IV e a amostra	
1 da arma III	90
Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma	
VII comparada com a amostra 2 da arma I	91
Comparação visual entre a amostra 1 da arma VII e a amostra	
2 da arma I	92
Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma	
VII comparada com a amostra 2 da arma VI	93
Comparação visual entre a amostra 1 da arma VII e a amostra	
2 da arma VI	94
	Comparação visual entre a amostra 1 da arma IV e a amostra 2 da arma VII

# Capítulo 1 Introdução

"... associai com a vossa fé a virtude; com a virtude, o conhecimento."

#### II Pedro, 1:5

Desde o início da sua evolução, a humanidade desenvolveu instrumentos para facilitar as suas atividades. Antes da agricultura e domesticação de animais, a caça era o principal método utilizado na obtenção de alimentos de origem animal e a necessidade de ferramentas para aumentar as chances de sucesso nas caçadas levou ao desenvolvimento das primeiras armas, que consistiam basicamente de pedaços de madeira, ossos e pedras, possibilitando o abatimento de animais de maiores proporções. Ao longo do processo evolutivo, mais armas foram desenvolvidas, visando cada vez mais abater animais maiores e a maiores distâncias, resultando na invenção de lanças, fundas, boleadeiras, arcos e flechas, mostradas na Figura 1.1.

O advento da pólvora negra, atribuído aos chineses que a utilizavam com objetivo lúdico sob a forma de fogos de artifício para as comemorações públicas, possibilitou um salto no desenvolvimento das armas. Utilizando-se a força expansiva produzida pelos gases decorentes da queima da pólvora, era possível propelir petardos através de um cano. Nasciam, então, as primeiras armas de fogo. Descritas detalhadamente em [Martinez, 1997], estas eram tão maciças e pesadas que eram consideradas pequenos canhões. Cons-



Figura 1.1: Armas primitivas e medievais desenvolvidas para a caça e para a guerra [Rabello, 1995].

tituíam-se basicamente de um cano de metal perfurado longitudinalmente ao centro e dotado de uma câmara de explosão que continha a pólvora, e utilizavam esferas de metal como petardos. Eram grandes, pesadas e com precisão de algumas dezenas de metros, isto devido à superfície interna do cano (também chamada de alma) ser lisa e aos projéteis que, embora fossem esféricos, possuíam irregularidades. Algumas delas são mostradas na Figura 1.2.

A utilização das armas ao longo da história da humanidade não se resumiu à caça. O homem também as empregava para cometer crimes. Em paralelo à evolução das armas, o cometimento de crimes com as mesmas era crescente. A ciência forense, que tem por objetivo o esclarecimento de crimes, acompanhou o desenvolvimento das armas e as respostas que elas poderiam trazer para as investigações. A identificação balística baseada em características específicas do projétil remonta o ano de 1835 [Hamby and Thorpe, 1999], na cidade de



Figura 1.2: Algumas das primeiras armas de fogo desenvolvidas pelo homem [Martinez, 1997].

Londres, Inglaterra, onde um aristocrata foi morto, sendo o suspeito seu serviçal. O sr. Henry Goddard, membro da polícia de Londres, investigou o caso. Analisando o projétil que matou a vítima, Goddard percebeu que o mesmo apresentava características compatíveis com as marcas do molde de projéteis que pertenciam ao serviçal. Além disso, percebeu que o papel de jornal, utilizado como bucha separando a pólvora do projétil, era da mesma edição do jornal encontrado no quarto do criado. Baseando-se nas marcas do projétil, Goddard esclareceu o crime e iniciou a investigação na área de balística forense.

A melhor definição para a Balística Forense é aquela apresentada pelo Professor Eraldo Rabello [Rabello, 1995]:

"Balística Forense é aquela parte do conhecimento criminalístico e médicolegal que tem por objeto, especial, o estudo das armas de fogo, da munição e dos fenômentos e efeitos próprios dos tiros destas armas, no que tiverem de útil ao esclarecimento e à prova de questões de fato, no interesse da justiça tanto penal como cível."

A evolução dos estudos sobre o movimento dos projéteis, bem como as novas técnicas de usinagem, levaram ao desenvolvimento, na Inglaterra

[Chant, 1995], das primeiras armas de fogo com cano de alma raiada. Tais armas apresentavam a alma do cano com seção perpendicular em formato poligonal e o alinhamento das arestas ao longo do cano em formato espiral, o que imprimia um sentido de giro aos projéteis, para a direita ou para a esquerda. Este movimento giratório em torno do próprio eixo e paralelo à trajetória confere maior precisão ao disparo, devido à compensação das irregularidades dos projéteis em torno dos trezentos e sessenta graus de giro dos mesmos. Para que esse movimento fosse aplicado aos projéteis, fazia-se necessário que seu diâmetro fosse ligeiramente maior que o diâmetro interno da arma de fogo, de forma que houvesse uma pressão suficiente das paredes do cano da arma para marcar a superfície lateral dos projéteis e, consequentemente, produzir o seu giro. Um fator adicional dos canos com alma raiada é a impressão no projétil das características únicas do cano da arma, que podem ser comparadas visualmente para, de maneira semelhante à utilizada por Goddard, determinar se aquele projétil foi, ou não, propelido através do cano da arma analisada.

O aumento da criminalidade e, principalmente, dos crimes cometidos com o uso de armas de fogo, criou a demanda por sistemas automatizados tanto de captura das imagens das marcas dos projéteis quanto da análise e comparação de tais estriamentos. Esta dissertação traz um estudo sobre os métodos disponíveis bem como a implementação de um sistema de aquisição, processamento e análise de imagens a ser utilizado como ferramenta de microcomparação balística.

## 1.1 Motivação

Um dos primeiros métodos de captura da imagem total da área lateral de um projétil propelido por uma arma de fogo de alma raiada foi implementado por Ernesto M. Belaunde [Rabello, 1995], chefe da *Sección Identificaciones* da Polícia de Buenos Aires. O aparelho idealizado por Belaunde, chamado por ele de *Fotocomparador*, era específicamente destinado à comparação de projéteis de arma de fogo, o qual permitia obter-se por fotografia direta a imagem bidimensional completa e ampliada das características da superfície de rolamento do projétil, que gira durante o tempo de exposição montado em um pivô, sincronicamente com o deslocamento da película fotográfica, conforme mostrado na Figura 1.3.



Figura 1.3: Fotocomparador de Belaunde, uma das primeiras máquinas destinadas à captura da imagem dos estriamentos dos projéteis propelidos por armas de alma raiada [Rabello, 1995].

Outro método para a captura das minúcias dos estriamentos de projéteis propelidos por armas de fogo foi o *Estriágrafo* desenvolvido por John E. Davis, do Departamento de Polícia de Oakland, Califórnia. O equipamento baseava-se no princípio de funcionamento dos sensibilíssimos analisadores de superfície de alta precisão utilizados para controles industriais. Consistia na obtenção das menores irregularidades das superfícies estriadas, tanto da parede interna, ou alma, do cano de uma arma de fogo, como das porções correspondentes ao corpo cilíndrico de um projétil expelido por uma dessas armas, realçando, sobretudo, as variações das grandezas em altura. O corte esquemático é mostrado na Figura 1.4.



Figura 1.4: Estriágrafo desenvolvido por John E. Davis para obter o perfil das estrias de projéteis propelidos por armas de fogo de alma raiada [Rabello, 1995].

Com evolução paralela aos métodos de fotografia ou captura das minúcias dos estriamentos dos projéteis, os meios de microcomparação ótica se aprofundaram até a implementenação do microscópio comparador ou microcomparador balístico. Instrumento bastante versátil, este foi o primeiro equipamento a possibilitar a comparação simultânea e justaposta de dois objetos comparados, com registro imediato e fiel das respectivas características coincidentes ou divergentes, e sem desfiguração das imagens dos referidos objetos, na escala de grandeza adequada em cada caso. Diversos são os modelos disponíveis até hoje no mercado. O Instituto de Criminalística da Polícia Civil de Minas Gerais utiliza atualmente dois modelos, sendo o mais atual o equipamento *LEICA* mostrado na Figura 1.5.



Figura 1.5: Microcomparador balístico Leica utilizado no Laboratório de Balística do Instituto de Criminalística da Polícia Civil de Minas Gerais, semelhante aos utilizados em outros estados.

Em que pese os excelentes resultados obtidos nos microcomparadores ópticos, estes ainda não eram capazes de armazenar as imagens dos projéteis e estojos comparados, além de não registrarem, para futuras consultas, as imagens dos casos em que os resultados comparativos eram positivos. Ainda, o aumento da criminalidade e, principalmente, a associação para o tráfico de drogas ocasionou uma explosão do número de armas de fogo em posse de criminosos, que as utilizam para a guarda de território, roubos, confrontos com policiais e demais crimes com uso de violência. A elevação do número de homicídios praticados por armas de fogo criou a demanda por sistemas não só de banco de dados com as imagens dos projéteis coletados em vítimas e locais de crime, quanto também de microcomparação automática, visando identificar crimes cometidos com a utilização das mesmas armas. Tais sistemas provocariam a inversão do fluxo de informações, que antes eram obtidas através de um processo muitas vezes demorado de levantamentos dos Agentes de Polícia, e transformariam o laboratório balístico em uma nova fonte de conhecimento sobre a conexão entre crimes.

Atualmente, são comercializados no Brasil três sistemas de microcomparação balística automática, sendo o *Sistema IBIS*, canadense e os Sistemas *Evofinder e Condor*, de origem russa. O sistema Ibis é utilizado atualmente pela polícia Técnico-Científica da Bahia e o Sistema Evofinder pelo Instituto de Criminalística da Polícia Civil de Minas Gerais. O custo de implantação de tais sistemas é superior a dois milhões de reais e o desenvolvimento e suporte principal se encontram nos países de origem dos sistemas. A necessidade de desenvolvimento de uma tecnologia nacional para a implantação de um sistema automático de banco de dados balísticos se justifica pelo grande mercado disponível no Brasil, uma vez que apenas dois estados já possuem tal tecnologia. Essa demanda motiva o estudo e o desenvolvimento de um sistema de microcomparação balística automática para a construção de um sistema de banco de dados de origem nacional, visando à redução de custos de aquisição e suporte para as demais polícias do país. A estrutura básica de um um sistema desta forma é descrita na Figura 1.6



Figura 1.6: Topologia proposta para um sistema automatizado de captura e armazenamento de amostra de projéteis para confronto balístico.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de propor a base de criação de uma metodologia para a microcomparação balística automática de projéteis atendendo os seguintes requisitos:

- confiabilidade, de forma que projéteis propelidos pela mesma arma sejam identificados de maneira objetiva e confiável;
- robustez, tornando o sistema independente de variáveis como diferenças grandes de iluminação ou foco das imagens;
- acessibilidade, configurando-se como um sistema de baixo custo e fácil operação;
- velocidade, com a determinação rápida da correlação entre as amostras.

Não se pretende atingir todos os requisitos apenas neste trabalho, que se mostra como o início para a criação de um sistema mais amplo e robusto. Espera-se que ao final do estudo seja possível avaliar a viabilidade do desenvolvimento deste sistema utilizando a metodologia proposta.

### **1.3** Sistema proposto e Contribuições

O sistema proposto neste trabalho baseia-se na captura da imagem da área lateral do projétil propelido por arma de fogo através de uma câmera com o disparador sincronizado ao giro de um motor de passo e à união das imagens obtidas em uma esteira, utilizando a matriz de homografia dos pontos característicos da imagem. Em seguida a assinatura do projétil é extraída utilizando-se as componentes de alta frequência das médias dos valores dos pixels das colunas da imagem, quase paralelos aos estriamentos, dada a pequena inclinação destes, para que, finalmente, seja possível compará-la à assinatura de outro projétil, obtida pelo mesmo procedimento, utilizando-se a função de correlação cruzada.

As principais características do sistema são:

- captura eficiente da imagem da área lateral do projétil, onde se encontram os microestriamentos utilizados na comparação;
- obtenção de uma assinatura para as características do projétil;
- utilização da função de correlação cruzada (FCC) para comparação entre os microestriamentos das amostras.

## 1.4 Organização da Dissertação

O Capítulo 1 apresentou a motivação, os objetivos, a metodologia e as contribuições desta dissertação. No Capítulo 2 é feita uma pequena introdução à criminalística, cujo desenvolvimento é o objetivo precípuo deste trabalho. Também serão apresentados os conceitos básicos de confronto balístico, utilizando-se o microcomparador e os trabalhos já publicados sobre a aplicação de técnicas computacionais na microcomparação balística. O objetivo é familiarizar o leitor com o problema tratado nesta dissertação, além de apresentar algumas soluções já apresentadas à comunidade científica por outros autores. O terceiro capítulo discorre sobre o método utilizado para a construção da imagem da área lateral do projétil, tanto em relação ao *hardware* quanto ao *software* desenvolvidos. Neste capítulo também é mostrada como é feita a extração do sinal que será analisado. O quarto capítulo trata sobre a função de correlação cruzada, a sua aplicação para a comparação de sinais e, consequentemente, a sua importância no trabalho desenvolvido. O Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais obtidos com a utilização do sistema proposto. As conclusões deste trabalho enfatizando as vantagens e limitações da metodologia proposta e os possíveis trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 6.

# Capítulo 2 Revisão de Literatura

"Ele respondeu: Pois como poderei entender, se alguém não me explicar?"

Atos, 8:31

A busca pela verdade real é o objetivo da Criminalística, ciência que se propõe a identificar e analisar os vestígios de uma ação criminosa. O Perito Criminal é o estudioso da Criminalística e deve sempre se pautar nos elementos técnicos constatados, seja na cena do crime, seja no corpo de delito, que pode ser, por exemplo, uma peça documental, um corpo já sem vida ou mesmo uma página de conteúdo da Internet. O termo *Criminalística* foi empregado pela primeira vez por Hans Gross [Cordioli, 2003], magistrado austríaco, que reconheceu desde cedo, no exercício profissional, a completa ineficiência dos métodos de investigação então empregados na polícia de sua terra natal.

No interesse da investigação criminal, a balística forense constitui-se como uma importante ferramenta para a caracterização de diversos tipos de crimes e dos instrumentos nele utilizados. A verificação de funcionamento e identificação das armas, munições e objetos e a comparação entre padrões balísticos são alguns dos exames realizados nos laboratórios balísticos. No presente estudo, será focado o exame de microcomparação balística de projéteis propelidos por armas de fogo. Essas marcas são produzidas pelo atrito dos projéteis contra a parede interna do cano da arma.

# 2.1 Processo de produção de canos de armas de fogo de alma raiada

O processo de fabricação de canos de armas de fogo apresenta como característica intrínseca a diferenciação de cada cano em função da ferramenta e do método de construção empregado. Atualmente, são três os métodos para a produção de raiamentos de canos de armas de fogo [Tocchetto, 2005], a saber: Sistema de Usinagem ou Brochamento por Corte, Brochamento por Bilha e Martelamento ou forjamento a frio. O primeiro consiste em perfurar o cano com uma ferramenta, chamada broca canhão, possibilitando a calibração do diâmetro interno do cano para a dimensão exata do calibre real, ou seja, aquele que será medido entre dois ressaltos do cano, no caso de número par de raias, ou entre um ressalto e um cavado do cano, no caso de número ímpar de raias. Em seguida, é utilizada uma broca de tamanho maior que produz o raiamento por usinagem, ou seja, retira o material (aço) correspondente à parte cavada do raiamento. Cada ferramenta é capaz de produzir o raiamento de 1.500 a 8.000 canos pelo mesmo processo, sendo que cada broca sofre, em média, dez afiações. A Figura 2.1 mostra o resultado deste processo.

O segundo processo de produção de raiamento de canos de armas de fogo, sistema de raiamento de brochamento por bilha, consiste em, inicialmente, perfurar os canos com uma broca de diâmetro ligeiramente inferior à dimensão do calibre real. Em seguida, a broca é passada através da alma do cano, produzindo o raiamento. Tal broca possui diâmetro ligeiramente superior ao do furo do cano, contendo em sua superfície externa a forma contrária 2.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CANOS DE ARMAS DE FOGO DE ALMA RAIADA



Figura 2.1: Fotografia mostrando o interior do cano de uma arma de alma raiada.

à do raiamento desejado. Ao serem tracionadas, as partes salientes da broca vão formar as raias. A ferramenta força o material excessivo correspondente à parte cavada do raiamento em direção à parte cheia, não ocupada pela peça, preenchendo aquele espaço e formando o ressalto do raiamento.

O mecanismo de confecção das raias por martelamento ou forjamento a frio consiste em forçar a passagem de uma barra cilíndrica de aço, furada e polida internamente, em um espaço inferior ao seu diâmetro externo, formado por quatro martelos situados de forma radial e simétrica em relação ao eixo da barra cilíndrica. No interior da barra, é introduzida a ferramenta responsável pela formação das raias, em formato cônico e superfície externa contrária ao raiamento que se pretende imprimir à arma. A barra cilíndrica recebe os impactos que a forçam contra os martelos, ocasionando a redução do diâmetro externo, aumento do comprimento e impressão das raias do cano da arma.

Como os diâmetros dos projéteis são, em regra, maiores que o diâmetro

interno do cano, a pressão dos gases da combustão força o projétil contra as paredes da alma do cano com tamanha força que todas as marcas ali existentes são transferidas para a área lateral dos projéteis. Todos os processos citados ocasionam microdeformações no interior do cano da arma, sendo elas variantes, mesmo em armas cujos canos foram fabricados com a utilização da mesma ferramenta. Tal diferença se justifica, uma vez que os metais não são perfeitamente homogêneos e a ferramenta sofre desgastes a cada milímetro percorrido durante o processo, diferenciando as deformações e permitindo que cada arma tenha uma característica única. Além desse fato, os fabricantes têm sempre o cuidado de separar as peças produzidas pelas mesmas ferramentas em lotes e destinações diferentes, justamente para evitar que armas fabricadas pela mesma peça sejam utilizadas em regiões geográficas próximas.

## 2.2 Comparação balística de projéteis

A comparação de projéteis é feita entre um ou mais projéteis incriminados, a saber, aqueles provenientes do cadáver ou da cena do crime, e um ou mais projéteis padrões, os quais serão obtidos efetuando tiros com a arma a ser comparada. Os padrões são colhidos em uma estrutura apropriada para capturar os projéteis, sem interferir nas marcas dos raiamentos dos mesmos. Inicia-se o exame comparativo pelas características macroscópicas do projétil incriminado (questionado). Determina-se o calibre, através da medição de seu diâmetro, o seu comprimento e a sua massa, com o auxílio de uma balança de precisão. O passo seguinte é a verificação do número, orientação e largura dos ressaltos (partes correspondentes ao maior diâmetro) e cavados (marcas em baixo relevo produzidas pela parte de menor diâmetro do raiamento da arma) do projétil. Detectadas as coincidências entre as características dos ressaltos e cavados, ou seja, entre as características macroscópicas, efetua-se então o exame de microcomparação balística.

Para a microcomparação balística de projéteis, aproveitam-se as características microscópicas únicas de cada cano de arma de fogo para comparar projéteis que passam pelo cano dessas armas. Este processo compara as ranhuras deixadas nos projéteis sabidamente propelidos pelo cano da arma padrão com as ranhuras do projétil questionado, sendo os mesmos colocados lado a lado e pesquisando por estriamentos coincidentes, conforme mostrado na Figura 2.2.



Projétil questionado Projétil padrão

Figura 2.2: Microcomparação balística entre dois projéteis de calibre .32 S&WL. A linha esfumaçada divide o projétil questionado do projétil padrão, mostrando também a coincidência entre os estriamentos dos mesmos [Tocchetto, 2005].

O processo de microcomparação balística deve levar em consideração alguns fatores adicionais relacionados às características e condições da peça questionada. As características dos padrões balísticos devem, na medida do possível, se aproximar daquelas apresentadas pela peça questionada. Estas características seriam, por exemplo, a presença, ou não, de revestimento do projétil, tipo de revestimento e estado de conservação da amostra questionada. Sobre as coincidências entre os projéteis - padrão e questionado o Professor Domingos Tocchetto é brilhante em referenciar as palavras de Pierre Fernand Ceccaldi em [Tocchetto, 2005], abaixo transcritas:

"Essas coincidências nunca serão perfeitas nem totais, porque, mesmo se dispararem vários tiros com a mesma arma, sempre haverá algumas diferenças ínfimas: o cano oxida-se, começa a ficar gasto, efetivamente dentro dele produzem-se deflagrações e, de uma para outra, podem dar-se modificações; e tanto assim é que, no fim, a balança penderá para o lado em que há superioridade de coincidência, embora essa superioridade não seja quantitativa, mas qualitativa; um único pormenor particularmente característico pode ter mais valor do que dez outros sem grande importância"

Para a determinação do grau de semelhança entre os projéteis, é necessária uma ferramenta que consiga avaliar as características comuns de maneira robusta às diferenças que sempre serão observadas. Alguns autores já se debruçaram sobre este problema e para a compreensão do trabalho ora apresentado faz-se necessária a contextualização do assunto em relação aos outros estudos já realizados e publicados sobre o assunto, visando entregar ao leitor os principais termos, problemas e soluções já discutidos na comunidade científica dedicada ao estudo dos métodos comparativos de projéteis de armas de fogo ou estudos similares.

### 2.3 Trabalhos já publicados

Em 1959, foi publicado um artigo, de autoria de Alfred A. Biasotti [Biasotti, 1959], sendo o primeiro estudo estatístico relativo à identificação balística baseada nas características do cano impressas em projéteis disparados através deste. Biasotti analisou os resultados obtidos por diversos disparos, utilizando armas distintas e diversos projéteis para determinar qual é o índice de semelhança esperado entre dois projéteis disparados pela mesma arma. Para seus estudos, Biasotti utilizou o microcomparador balístico, que já era usado naquela época, e se baseou em trabalhos publicados sobre análise forense de marcas produzidas por ferramentas, o que já apresentava grande utilidade na área forense naquela época.

Em seu trabalho, Biasotti utilizou o calibre .38 Smith Wesson Special, para produzir os resultados. As armas utilizadas eram todas de mesmo calibre, da marca Smith & Wesson, modelo Victory. Tais armas foram escolhidas por sua disponibilidade, qualidade e possibilidade de disparar projéteis, tanto de chumbo quanto revestidos de cobre, além de apresentarem o raiamento com medidas semelhantes. No transcorrer dos trabalhos, Biasotti percebeu que, para projéteis de chumbo disparados pela mesma arma, o percentual de linhas coincidentes por raiamento era compreendido entre 36 e 38%. Para projéteis com revestimento de cobre, entre 21% e 24%, e para projéteis disparados por armas diferentes, entre 15% e 20%. Outra análise implementada no estudo foi a probabilidade de ocorrência de linhas coincidentes consecutivas entre duas amostras. Em todos os casos, Biasotti notou que as linhas coincidentes consecutivas em amostras colhidas de armas diferentes eram, no máximo, três. No caso de amostras disparadas pela mesma arma o número máximo era de cinco linhas, estabelecendo-se, assim, de acordo com o estudo, o critério mínimo de quatro linhas coincidentes para se determinar se as duas amostras foram produzidas pela mesma arma.

Ainda nos dias atuais, diversos pesquisadores procuram estabelecer um modelo definitivo para a identificação das características comuns entre duas amostras sob análise. Um paralelo muito frequente é feito comparando-se de marcas específicas produzidas por ferramentas em diversas superfícies, justamente pelo tipo de características encontradas que, sob um olhar menos criterioso, pode até confundir-se com a análise de estriamentos produzidos por armas de fogo. A AFTE (Association of Firearms and Tool mark Examiners) foi criada em 1969, com o intuito de compartilhar informações e descobertas na área de identificação balística e de marcas produzidas por ferramentas. Dentre os estudos conduzidos existem diversos posicionamentos. O trabalho publicado por Ronald Nichols [Nichols, 2006] analisa o artigo publicado por Adina Schwartz [Schwartz, 2005] que contesta os exames de microcomparação balística e análise de marcas de ferramentas afirmando que não existe uma base estatística sólida para tais exames. Diz ainda que o elevado número de marcas coincidentes entre padrões reconhecidamente produzidos por instrumentos diferentes é uma prova de que os exames não permitem a identificação única de uma amostra. Ronald Nichols combate os argumentos de Adina Schwartz apresentando diversos artigos acadêmicos, comprovando, estatisticamente, a possibilidade de identificação de padrões únicos produzidos por uma mesma peça, bem como a exclusão de padrões distintos, mesmo que esses apresentem marcas coincidentes.

O aumento da criminalidade associada ao maior número de armas de fogo criou como necessidade premente o desenvolvimento de métodos mais ágeis para a análise de amostras de projéteis coletados em vítimas e locais de crime. A demanda de sistemas capazes de automatizar a análise de projéteis tornouse real e, assim, vários têm sido os trabalhos no sentido de estabelecer um
método razoável para a microcomparação balística automática. As etapas para a criação de um sistema com esse objetivo são basicamente três, a saber:

- captura da imagem dos estriamentos estabelecendo uma imagem única que traduza todas as marcas presentes na área lateral dos projéteis;
- processamento da imagem visando ressaltar as minúcias dos estriamentos, realçando-os;
- 3. estabelecimento de um método comparativo entre duas ou mais amostras utilizando alguma ferramenta matemática para esta finalidade.

Nesta linha, os trabalhos publicados buscam implementar métodos de identificação e análise das minúcias impressas pelos canos das armas de fogo nos projéteis. As principais diferenças entre eles são a forma como a imagem do projétil é adquirida, o processamento da imagem para ressaltar as minúcias dos estriamentos e o método de análise da imagem para a determinação da coincidência, ou não, das amostras. Ponto comum entre todos é a necessidade de extrair uma imagem em duas dimensões a partir de um objeto cilíndrico, que seria o prójétil. A solução mais frequente para este problema é girar o projétil em torno do seu próprio eixo e sincronizar este movimento com a captura da imagem, fazendo-se a fusão das diversas imagens obtidas, que mostrarão a área lateral do projétil.

No trabalho desenvolvido por Fernando Puente León [León, 2006], diversas imagens do objeto foram concatenadas, obtendo uma esteira que seria o plano lateral do projétil. A média dos pixels da imagem resultante era tomada, tomando-se o sentido perpendicular ao comprimento da esteira, formando um sinal que era filtrado aplicando-se a transformada Top-Hat [de Oliveira Júnior, 1998], que é especialmente indicada para a deteção de picos e vales que, no caso em questão, consegue determinar a presença de linhas claras ou escuras na imagem. O resultado obtido era confrontado com outras amostras de projéteis disparados pela mesma arma utilizando a Função de Correlação Cruzada. León obteve bons resultados na comparação empregando o seu método, entretanto para a extração da assinatura era utilizada toda a área lateral do projétil, de maneira que não era possível avaliar a consistência dos estriamentos através da comparação desses em dois pontos diferentes ao longo do projétil.

No trabalho de Dongguang Li [Li, 2006] é proposto um método alternativo de coleta e análise da imagem do projétil. Na aquisição da imagem é feita a normalização do contraste da imagem para reduzir o ruído produzido pelas imperfeições da superfície e problemas de iluminação. Posteriormente é aplicada uma máscara para detecção de linhas, para o que é implementado o filtro de Sobel no sentido longitudinal do projétil, visto que as minúcias estarão nessa direção. Uma vez adquirida e processada a imagem, a análise do projétil é feita utilizando a Transformada Rápida de Fourier para detectar as minúcias e comparar os projéteis. Neste trabalho o principal resultado foi estabelecer a diferenciação entre as texturas dos diversos projéteis, porém sem efetuar a comparação entre eles.

Já a abordagem feita por Clifton L Smith, Max Robinson e Paul Evans [L.Smith et al., 2000] utiliza o escaneamento em linhas para adquirir a imagem e o perfil tridimensional do projétil. Através deste perfil era feita a comparação entre as amostras. Nesse trabalho não é aplicado nenhum filtro ao sinal obtido pelo sensor laser e a comparação é feita apenas visualmente, pela superposição dos sinais obtidos. A imagem adquirida não é analisada, sendo apenas utilizada para apresentar ao observador o espécime sob estudo para embasar os resultados do sistema. Métodos similares de captura da imagem também são apresentados por A. Zographos e outros em [Zographos et al., 1997], por Clifon L. Smith em [C.L.Smith and J.M.Cross, 1995].

Na comparação entre as imagens, são aplicados diversos métodos, seja a função de correlação cruzada, já citado anteriormente no trabalho de Fernando Puente León, seja a utilização da FFT, proposto por Dongguang Li. O método proposto por Chenyuan Kou, Cheng-Tan Tung e H.C.FU em [Kou et al., 1994] utiliza redes neurais com um modelo SOFM (*Self-Organized Feature Map*) para a comparação das marcas de estriamentos dos projéteis, em que se concluiu que o método apresenta grande dificuldade de extração das características específicas dos projéteis, demandando elevado tempo de processamento, além de ser muito sujeita a ruídos da imagem.

Os métodos de análise dos estriamentos de projéteis propelidos por armas de fogo derivam da análise de marcas de ferramentas, muitas vezes úteis em investigações criminais, justamente por se tratarem de características produzidas pela repetição sucessiva das imperfeições dos instrumentos utilizados. Nesta abordagem se situam os trabalhos de Michael Heizmann e Fernando Puente León [Heizman and León, 2003], que utilizam a extração de características específicas das marcas de ferramentas para estabelecer uma assinatura possível de ser confrontada com marcas produzidas em laboratório. No trabalho, foram analisadas marcas produzidas por ferramentas que tinham por característica principal a presença de linhas paralelas e nem sempre retas. A proposta do trabalho foi implementar um método confiável para a conversão de linhas curvas em linhas retas no sentido de determinar uma assinatura para aquelas ferramentas em questão. Foram utilizados métodos de correção e suavisação da imagem para atingir este objetivo.

#### 2.4 Proposta do trabalho

O presente trabalho propõe, para a captura da imagem, a utilização de uma câmera CCD acoplada a uma lente macro com aumento de 6 vezes para a captura das imagens que formam a área lateral do projétil, a utilização de um filtro passa-altas de primeira ordem para o realce das altas frequências da imagem e, consequentemente, das características individualizadoras do estriamento do projétil e a comparação das amostras, utilizando a função de correlação cruzada.

A escolha da função de correlação cruzada se deve aos bons resultados obtidos com a sua aplicação em trabalhos cujo objetivo é a a identificação e comparação de sinais, tais como em [Kreutz and Olpel, 1996], [Cruz, 1998], [Diehl and Bacchi, 2006], [Hohreiter et al., 2002], [Kohl et al., 2002] e [Thews et al., 2005]. O próximo capítulo apresentará o sistema de captura e pré-processamento das imagens, mostrando o equipamento e procedimentos desenvolvidos neste trabalho.

## Capítulo 3

## Captura da Imagem e Extração do Sinal

"Poderei fazer tudo com a ajuda de Cristo. Ele me dará forças."

Filipenses, 4:13

O início do processo de comparação de microestriamentos de maneira automática passa pelo problema de captura da imagem da área lateral do projétil. Uma vez que este apresenta formato cilíndrico, apenas uma captura da imagem não consegue alcançar toda a sua área lateral. Assim, tem-se o seguinte problema:

**Problema da captura da imagem** - Sendo o projétil de formato cilíndrico, como capturar a imagem de toda a área lateral desse, onde estão localizados os microestriamentos?

Para solucionar o problema apresentado foi definido o algoritmo representado no fluxograma mostrado na Figura 3.1.

O sistema para implementação da rotina descrita no fluxograma mostrado na Figura 3.1 depende da especificação da câmera a ser utilizada, do sistema de rotação do projétil e do método de determinação dos pontos de referência e união das diversas imagens obtidas para a construção da imagem final. Todos os passos foram reunidos em um único programa de computador, utilizando a linguagem C++, que envia o comando para a câmera capturar a imagem,



Figura 3.1: Fluxograma para captura da imagem da área lateral do projétil.

implementa as rotinas de determinação dos pontos de referência e união das imagens e envia o comando para o passo de giro do projétil, reiniciando o processo, que era repetido até se obter um giro completo do projétil.

#### 3.1 Escolha da câmera

Na construção do sistema automatizado de captura da imagem dos projéteis, um ponto óbvio para a escolha da câmera é a possibilidade de comando da captura das imagens de maneira computadorizada, funcionando como um módulo do programa completo. Com esse objetivo, foi adotada a câmera Dragonfly II, fabricada pela Point Grey Research, que possui uma interface do tipo IEEE-1394.

Para o acionamento da câmera, foi desenvolvido, também utilizando a linguagem C++, um pequeno módulo que capturava a imagem com uma resolução de 800x600 pixels. Foi acoplada uma lente à câmera, com objetivo de ampliar a imagem de maneira a ser possível visualizar os estriamentos que serão comparados. A lente, do modelo Navitar 7000E, dotada de capacidade máxima de seis aumentos, permitia o ajuste de abertura e foco manuais. A aquisição era feita com a imagem em formato RGB, ficando a conversão para o formato em escala de cinza a cargo do programa desenvolvido. Isto se deve à baixa qualidade das imagens em escala de cinza extraídas diretamente da câmera.

#### 3.2 Escolha do mecanismo de giro do projétil

Para que fosse possível fotografar toda a área lateral do projétil, foi necessário o desenvolvimento de um mecanismo de giro acionado pelo computador. Foi escolhido um motor de passo, dada a facilidade de comando deste. Como no laboratório já havia uma placa específica para comando com iterface via cabo USB, foi possível utilizá-la para o controle do motor. O projétil era acoplado a uma peça cilíndrica de alumínio, cuja extremidade possuía um baixo relevo com diâmetro idêntico ao do projétil. Nesse baixo relevo foi aderida a mesma cera utilizada nos microcomparadores convencionais, para acoplamento do projétil.

Foi também necessária a utilização de uma cobertura opaca de plástico branco para uniformizar a iluminação no projétil, funcionando como um sistema simplificado de difusão de luz. Tal cobertura era colocada sobre o projétil e o suporte, possuindo uma janela para que a visualização do projétil a partir da câmera. O sistema completo pode ser visualisado na Figura 3.2.



Figura 3.2: Hardware utilizado na captura das imagens dos projéteis.

## 3.3 Determinação dos pontos de referência e união das imagens

Na concatenação de imagens, um dos maiores problemas é a determinação do fluxo óptico entre imagens subsequentes. O fluxo óptico é a medida de deslocamento dos pixels comuns nas imagens, permitindo determinar o deslocamento espacial da imagem, conforme mostrado na Figura 3.3. Uma forma de se obter essa determinação é utilizar a SIFT (*Scalar Invariant Feature Transform*)[Lowe, 2004], que é um método de identificação de objetos em imagens, mesmo que esses sofram variações de escala, rotação ou iluminação. Essa transformada será detalhada a seguir.

#### 3.3. DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA E UNIÃO DAS IMAGE**29**



Figura 3.3: Determinação do fluxo optíco de uma imagem.

#### 3.3.1 Scalar Invariant Feature Transform - SIFT

A SIFT é um método para extração de características que sejam robustas à variação de escala e rotação em imagens. Tais características são chamadas pontos chave (*keypoints*). Os pontos-chave também devem apresentar robustez em relação às mudanças na posição do ponto de vista, iluminação e ruído. Tal metodologia pode ser utilizada para implementar o confronto e reconhecimento de uma imagem dentre aquelas armazenadas em uma base de dados de imagens. As características dos pontos-chave são observadas tanto no domínio do espaço quanto no domínio da frequência. Cada ponto chave é composto por trinta e dois vetores, chamados descritores, que são gerados quando da aplicação do algoritmo. Tais descritores são armazenados em uma matriz que os correlaciona com o pixel ao qual fazem referência. O custo de extração das imagens é minimizado, utilizando-se uma abordagem de forma que as operações mais pesadas são aplicadas somente em regiões que passam em um teste inicial composto de quatro etapas:

 A primeira etapa consiste em uma busca em todas as escalas e pontos da imagem, utilizando-se um filtro de Diferença de Gaussiana (*difference*of-Gaussian - DoG) para detectar pontos de interesse em potencial que sejam invariáveis em relação à escala e orientação. Esta etapa é chamada Scale-space extrema detection, mostrada na Figura 3.4;



Figura 3.4: Filtro de Diferença da Gaussiana para aplicação da transformada SIFT.

- Na segunda etapa, é feito um refinamento na localização dos pontos chave, medindo a estabilidade dos pontos candidatos em relação à variação de escala e rotação (Figura 3.5);
- 3. A terceira etapa consiste em atribuir uma ou mais orientações a cada



Figura 3.5: Verificação da estabilidade dos pontos-chave.

ponto-chave, baseando-se na direção do gradiente da imagem naquele ponto;

4. Na quarta etapa, o gradiente da imagem é medido na região em torno do ponto chave, de forma a garantir robustez às variações provocadas por distorções ou mudanças na iluminação. Essa etapa é ilustrada na Figura 3.6.

O método proposto por Lowe [Lowe, 2004], apesar de ter como objetivo primordial a detecção de objetos, mostrou-se muito eficiente para a determinação do fluxo óptico das imagens do projétil. A área de interseção entre as imagens subsequentes era a base para a extração dos pontos chave. O ponto de referência para a união das imagens foi o ponto-chave mais próximo da lateral esquerda da nova imagem, uma vez que o sentido de rotação adotado foi da direita para a esquerda. Assim, assumindo o ponto de referência,



Figura 3.6: Construção dos pontos-chave com a avaliação do gradiente da imagem em torno dos mesmos.

a imagem atual é cortada até este ponto e nela é concatenada a parte da imagem nova, posterior ao ponto de referência. Este processo é mostrado nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

Durante os ensaios iniciais percebeu-se que ocasionalmente um ou mais pontos chaves apresentavam coincidência nos descritores, produzindo erro na união das imagens. Para evitar que isso ocorra, um mecanismo simples de checagem foi adotado. Assumindo que o projétil só apresenta movimento de rotação em um sentido, para a escolha do ponto de referência era feita a análise de sua localização em cada uma das imagens. Se a variação vertical, perpendicular ao sentido de giro, fosse maior do que dez pixels, para cima ou para baixo, o ponto de referência era descartado e outro ponto era analisado. Também, sabendo que o giro do projétil por passo era de 10,6 graus, havia uma margem de confiança de dez pixels para a posição horizontal do ponto de referência. Se este ponto de referência estivesse fora dessa margem de confiança, descartava-se o ponto e um outro era avaliado. Essa análise é mostrada na Figura 3.10.

Uma vez unida a imagem nova à imagem atual, reinicia-se o processo até que o projétil tenha completado um giro completo. Ao final, é feito o corte da



3.3. DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA E UNIÃO DAS IMAGE**33** 

Figura 3.7: Definição dos pontos-chave e escolha do ponto de referência para a fusão das imagens.

imagem para que todas aquelas produzidas tenham o mesmo tamanho, correspondente ao perímetro do projétil, facilitando o algoritmo de correlação. Para o caso em questão, as imagens possuíam tamanho de 1480x500 pixels. Cumpre ressaltar que a altura das imagens foi limitada em 500 pixels para descartar partes da imagem obtida pela câmera que extrapolavam as medidas do projétil.



Figura 3.8: Corte nos pontos de referência e concatenação das imagens.



Figura 3.9: Resultado da fusão das imagens.

#### 3.3. DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA E UNIÃO DAS IMAGE\$\$



Figura 3.10: Avaliação da confiabilidade do ponto chave escolhido.

## 3.4 Extração do sinal a partir da imagem obtida

Capturada a imagem da área lateral completa do projétil, o próximo passo foi extrair dessa imagem um sinal que apresentasse as características do estriamento da arma e que pudesse ser comparado, objetivando determinar o grau de semelhança entre projéteis diferentes propelidos pela mesma arma. Uma forma simples de se obter este sinal é utilizar uma linha de pixels paralela ao comprimento da imagem. A variação da intensidade de cinza dos pixels demonstrará o contraste e, consequentemente, a diferença de profundidade da superfície do projétil coberta por aquela faixa. Aplicando-se este raciocínio, foi feita a extração de uma amostra deste sinal de um projétil de exemplo, cujo resultado é mostrado na Figura 3.11.

Imagem do projétil



Na Figura 3.11, o eixo das abcissas indica a posição horizontal do pixel. O eixo das ordenadas indica a intensidade de cinza do pixel, que pode variar de 0, no caso da cor preta, até 255, no caso da cor branca.

Uma vez que a direção dos estriamentos é quase perpendicular à linha de pixels escolhida, a variação brusca de intensidade de cinza traduz o relevo da superfície do projétil, porém ainda está sujeita a ruídos introduzidos por diferenças de coloração do metal produzidas por oxidação ou irregularidades não relacionadas aos estriamentos. Para tentar reduzir essa influência, optouse, então, por extrair o sinal a partir da média dos pixels das colunas de uma faixa paralela ao comprimento da imagem. Esta média vai produzir dois efeitos muito interessantes para o objetivo do sistema. O primeiro é reduzir sensivelmente o ruído, uma vez que a média funciona como um filtro passabaixas. O outro efeito é reforçar as linhas, devido à sua pequena inclinação em relação ao eixo vertical. No entanto, a largura dessa faixa não pode ser muito grande em virtude da pequena inclinação percebida nos estriamentos. No presente trabalho foi determinada de maneira empírica que, se uma faixa de vinte pixels de largura for utilizada, o desejado efeito de filtragem do ruído será obtido, sem que a inclinação produza uma filtragem também dos estriamentos mais finos. O método descrito foi empregado, e se obteve o resultado apresentado na figura seguinte:

Comparando-se os dois sinais mostrados, nas Figuras 3.11 e 3.12, percebese a atenuação do ruído proporcionada pela média dos pixels, melhor evidenciada na Figura 3.13.

No caso futuro, poderá ser feito o alinhamento dos estriamentos com a vertical, utilizando-se o atraso entre as linhas de pixels, fornecido pela função de correlação cruzada, como fator de ajuste do posicionamento das linhas.

Para se avaliar a qualidade da amostra obtida, utilizam-se duas faixas de cada projétil, uma mais próxima à base e outra mais próxima ao topo do projétil. Essa qualidade depende das características do projétil coletado,



Figura 3.12: Sinal obtido a partir da média da intensidade de cinza de uma faixa de pixels paralela ao comprimento da imagem do projétil.

tais como, grau de dureza da liga metálica, oxidação do metal, superfície e diâmetro real do projétil. Se o projétil apresenta estas características de maneira mais uniforme, espera-se que um valor mais elevado para o resultado da função de correlação cruzada entre os sinais obtidos em cada ponto distinto da imagem, uma vez que todo o projétil esteve em contato com os mesmos pontos do cano da arma. Dessa forma, em todas as análises desenvolvidas utilizaram-se dois campos de cada projétil, conforme mostrado na Figura 3.14.

Obviamente, a localização dos campos tomados como referência para a avaliação da qualidade da amostra dependerão do calibre do projétil analisado. No presente trabalho, o campo "A" foi tomado entre as linhas 430 e 450 e o campo "B" entre as linhas 130 e 150, todas contadas a partir do topo da imagem.



Figura 3.13: Comparação entre os sinais obtidos a partir da linha e da faixa de pixels paralelas ao comprimento da imagem.



Figura 3.14: Campos utilizados nas comparações entre os projéteis.

### Capítulo 4

## Comparação de Sinais Utilizando a Função de Correlação Cruzada

"E disse o Senhor: A quem, pois, compararei os homens desta geração, e a quem são semelhantes?"

Lucas, 7:31

A análise de similaridade entre as características de dois projéteis deve ser feita de maneira que somente aquelas realmente relacionadas às marcas específicas do cano da arma sejam levadas em consideração, permitindo a determinação quantitativa do grau de semelhança entre as amostras. As perguntas chave para analisar as características do sinal obtido a partir do projétil são:

- O método utilizado é confiável para determinar o grau de semelhança neste sinal?
- Existe alguma forma de identificar o ponto máximo de semelhança entre os sinais?
- A distribuição de freqüências do sinal tem alguma influência no resultado da análise deste sinal?

• Existiria a possibilidade de se obter algum resultado "falso positivo" para sinais obtidos a partir de projéteis diferentes, propelidos por armas di-ferentes? Se sim, como evitá-los?

O método escolhido neste trabalho, para a análise das imagens dos projéteis é a Função de Correlação Cruzada [Aguirre, 2004]. Conforme sugerido por [Aguirre, 2004], a robustez com respeito ao ruído é uma das características desejáveis da Função de Autocorrelação e da Função de Correlação Cruzada, o que as recomenda em problemas de identificação de sistemas, uma vez que em suas definições se apresenta o "efeito de média" (*averaging*).

A função de correlação cruzada (FCC) entre dois sinais u(t) e y(t) é definida como [Aguirre, 2004]:

$$r_{uy}(\tau, t) = E[u(t)y^*(t+\tau)]$$
(4.1)

Se for considerado que o processo é real, nesse caso  $y^*(t) = y(t)$ , é ergódico a fim de poder substituir a esperança matemática  $E[\cdot]$  pela média temporal, e assumiu-se estacionariedade para eliminar a dependência da FCC com o tempo. Desta forma a Equação 4.1 se transforma em:

$$r_{uy}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} u(t) y(t+\tau) dt, \qquad (4.2)$$

Já no caso discreto, a equação 4.2 torna-se

$$r_{uy}(k) = \lim_{N \to \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^{N} u(i)y(i+k),$$
(4.3)

A abordagem acima apresenta-se mais adequada para o problema em questão, já que as imagens digitais são obrigatoriamente discretas.

Na implementação feita para este trabalho, a Função de Correlação Cru-

zada foi aplicada de maneira circular, ou seja, a cada atraso, o os dados eram deslocados e o último valor era assumia o lugar do primeiro, de maneira que ocorria o giro dos valores em relação aos atrasos, de maneira semelhante ao ato do Perito girar o projétil no microcomparador óptico, em busca do ponto de semelhança entre as amostras analisadas.

Neste trabalho, optou-se por iniciar a análise pela Função de Autocorrelação (FAC) dos sinais obtidos. Uma vez que se procura encontrar o grau de similaridade entre sinais distintos, faz-se necessário entender qual é o grau de semelhança de um sinal com ele mesmo, para vários atrasos. Uma função periódica terá o valor máximo para a FAC com atraso igual ao período. Já um sinal totalmente aleatório terá FAC igual a 1 com o atraso zero e FAC igual a zero para todos os outros atrasos. Uma vez que a análise dos estriamentos dos projéteis propelidos por armas de fogo são decorrentes do processo de fabricação da arma, associados a pequenas imperfeições do cano e do projétil, espera-se que a FAC obtida a partir da imagem deste projétil tenha apenas um valor máximo no atraso zero com um valor muito menor de FAC para os outros atrasos. Assim, para a compreensão do que se deve esperar como resultado positivo para a coincidência entre duas amostras de projéteis o primeiro passo é analisar a Função de Autocorrelação (FAC) de um projétil. A FAC é definida como a função de correlação cruzada de um sinal com ele mesmo, ou seja, para o caso digital:

$$r_{uu}(k) = \lim_{N \to \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^{N} u(i)u(i+k), \qquad (4.4)$$

O resultado obtido para a FAC do sinal de um projétil é apresentado na Figura 4.1. Nota-se que há uma distribuição bastante ampla de resultados expressivos para a FAC deste sinal. Isto é devido às componentes em baixas frequências.



Figura 4.1: FAC do sinal íntegro obtido a partir da imagem do projétil.

Para confirmar esta assertiva, foi feita a filtragem do sinal em baixas e altas frequências. Para a filtragem das imagens, inicialmente foi aplicada a Transformada Rápida de Fourrier (FFT - *Fast Fourrier Transform*) ao sinal (Figura 4.2). Em seguida, foi aplicado um filtro Butterworth de primeira ordem (Equação 4.5), com frequência de corte em 5,19 Hz, obtendo-se então a filtragem das altas frequências do sinal (Figura 4.3). A filtragem foi obtida multiplicando ponto a ponto o filtro pelas frequências componentes do sinal.



Figura 4.2: Sinal íntegro e FFT do sinal íntegro.

$$H(f) = \frac{1}{1 + (f/f_c)^2} \tag{4.5}$$

O mesmo procedimento foi aplicado para a filtragem em passa-altas (Equação 4.6), mostrada na Figura 4.4. A frequência de corte também foi de 5,19 Hz.



Figura 4.3: Filtro Butterwort passa-baixas de primeira ordem e componentes de baixas-frequências do sinal.

$$H(f) = \frac{1}{1 + (f_c/f)^2}$$
(4.6)



Figura 4.4: Filtro Butterwort passa-altas de primeira ordem e componentes de altas-frequências do sinal.

Em seguida à aplicação dos filtros, era aplicada a Trasformada Inversa de Fourrier (IFT - *Inverse Fourrier Transform*) e eram obtidos os sinais filtrados (Figura 4.5).

Os resultados das FAC's dos sinais filtrados são mostrados na Figura 4.6. Comparando os resultados das funções de autocorrelação do sinal íntegro,



Figura 4.5: Sinais obtidos a partir das baixas e altas frequências dos sinais.

das baixas e altas frequências, nota-se que o formato da FAC para as componentes em alta frequência apresenta um pico muito destacado para um atraso específico com um valor muito menor para o restante do sinal. Este formato de resposta para a FAC é bastante parecido com aquele obtido para sinais aleatórios. Como nas imagens são as componentes em alta frequência que determinam os detalhes, é esperado que, no sinal extraído desta imagem, os fatores de diferenciação também estejam nessas altas frequências.

Conforme foi mencionado anteriormente, a análise de correlação cruzada seria feita em dois campos da imagem do projétil, visando avaliar a qualidade da amostra obtida. Este resultado foi utilizado como referência para a comparação entre imagens de projéteis diferentes. A comparação entre dois sinais obtidos a partir de uma das amostras é mostrado na Figura 4.7.

Observando o resultado da FCC entre os sinais de dois campos diferentes do mesmo projétil nota-se imediatamente a redução significativa do valor máximo de correlação, nesse caso na ordem de 40%. O valor máximo desta correlação será utilizado também como parâmetro para as comparações entre projéteis diferentes, visando determinar se os mesmos foram propelidos pela mesma arma. Para cada um dos projéteis candidatos foi feita a correlação cruzada entre dois campos e foi obtido o valor máximo para a correlação.



Figura 4.6: FAC do sinal íntegro obtido a partir da imagem do projétil, bem como das componentes em baixas e altas frequências deste sinal.



Figura 4.7: Resultado da função de correlação cruzada entre dois campos diferentes do mesmo projétil.

Quando dois projéteis eram comparados, fazia-se a média entre os valores máximos obtidos para determinar o valor de referência para a análise, tomado como a metade desta média. No capítulo seguinte serão mostrados os resultados experimentais obtidos.

A etapa seguinte é estabelecer um intervalo de confiança para o resultado obtido. Este intervalo de confiança garante que a correlação cruzada poderá ser considerada igual a zero para todos os atrasos cujos valores da função de correlação cruzada estejam abaixo deste intervalo. Conforme [Aguirre, 2004], seja uma variável aleatória x cuja distribuição é gaussiana com média  $\bar{x}$  e desvio padrão  $\sigma_x$ . Seja uma determinada realização  $x_i$  de x, então a probabilidade de  $x_i$  estar compreendida na faixa:

$$\bar{x} - 3\sigma_x < x_i < \bar{x} + 3\sigma_x,\tag{4.7}$$

é 99,7%. Seja  $\hat{r}_{xx}$  a função de autocorrelação de x estimada a partir de uma amostra de tamanho N. O desvio padrão de  $\hat{r}_{xx}$  é dado por  $\sigma_{\hat{r}} = \sigma_x/\sqrt{N}$ . Logo, assumindo-se que a distribuição de  $\hat{r}_{xx}$  é gaussiana e usando-se os resultados em 4.7, pode-se concluir que se a FAC de um sinal u(k) com média zero satisfizer a relação:

$$-\frac{2\sigma_u}{\sqrt{N}} < \hat{r}_{xx}(k) < +\frac{2\sigma_u}{\sqrt{N}}, \ \forall k \neq 0,$$

$$(4.8)$$

tal sinal pode ser considerado aleatório com um índice de confiança de 99,7%. O mesmo raciocínio pode ser aplicado na função de correlação cruzada  $\hat{r}_{uy}(k)$ , que é normalizada dividindo-se por  $\sigma_u \sigma_y$ . Assim, o limite de confiança será de 2,576 $\sqrt{N}$ , para o nível de confiança de 99,7%. Isto significa que resultados da FCC abaixo desse valor podem ser considerados iguais a zero, ou seja, não representativos. Se um resultado de FCC apontar apenas um ou alguns pontos agrupados, com valor diferente de zero, isso demonstra que aqueles dois sinais estão relacionados espacialmente em apenas um atraso, mostrando a semelhança entre eles.

Na presente pesquisa, o intervalo de confiança é um indicativo da correlação entre as amostras, entretanto não foi a única referência estabelecida para determinar se as amostras comparadas foram produzidas pela mesma arma. Uma referência baseada na correlação cruzada entre campos diferentes do mesmo projétil se fez necessária para estabelecer o nível de qualidade das amostras e, também, qual seria o valor mais indicado para referenciar os resultados de correlação. Uma amostra com qualidade ruim geraria um resultado ruim para a FCC entre campos diferentes desta amostra. Caso essa referência não fosse adotada, a análise seria prejudicada pela baixa qualidade da amostra. Esta referência foi estabelecida como a média do valor máximo de correlação cruzada entre os campos A e B de cada projétil:

$$Ref = \frac{MAX(P1_{AB}) + MAX(P2_{AB})}{2},$$
(4.9)

onde:

- Ref é o valor de referência a ser adotado para aquela análise
- MAX(P1<sub>AB</sub>) valor máximo para a FCC entre os campos A e B do Projétil 1
- MAX(P2<sub>AB</sub>) valor máximo para a FCC entre os campos A e B do Projétil 2

Cumpre esclarecer que essa referência tem carater subjetivo, pois simboliza o quão as amostras obtidas são semelhantes invidualmente entre si e, assim, se apresenta como um valor esperado do resultado se as amostras forem correlacionadas. Desta forma, valores acima ou abaixo da referência são aceitáveis, entretanto o maior indicativo de correlação entre as amostras é o número de picos destacados da função de correlação cruzada.

## Capítulo 5 Resultados Experimentais

"Tudo quanto fizerdes, quer de palavras, quer de obras, fazei tudo em nome do Senhor Jesus, dando por Ele graças a Deus Pai."

Colossenses, 3:17

Para avaliar a análise descrita anteriormente foram coletados padrões de sete armas diferentes, todas de calibre .40S&W, da marca IMBEL, modelo MD5. Tais armas foram escolhidas por serem as armas de dotação das polícias Civil e Miltar do Estado de Minas Gerais, sendo os espécimes analisados de dotação do Instituto de Criminalística. As armas foram numeradas de I a VII, tendo sido obtidos dois projéteis de cada arma. Em seguida serão apresentados os resultados para a captura da imagem de cada amostra e os resultados das análises das correlações entre elas.

# 5.1 Resultado da captura das imagens dos projéteis

Os resultados das aquisições das imagens são mostrados nas Figuras de 5.1 a 5.14. Observa-se que nas imagens obtidas a união dos diversos quadros foi feita de maneira adequada, com pontos de fusão imperceptíveis na maioria das imagens, atestando a eficiência do *hardware* e *software* para união das imagens. Como o equipamento não dispunha de lente para ajuste de foco automático, não foi possível a aquisição de imagens ainda melhores. Em alguns casos, como nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.12, ocorreram alguns pontos onde a união dos quadros formadores da imagem foi percebida nitidamente. Tal resultado foi provavelmente decorrente da falta do ajuste automático de foco da lente utilizada. O processo de captura, incluindo a união das imagens, é executado em, aproximadamente, dois minutos.



Figura 5.1: Projétil 1 colhido da arma I.



Figura 5.2: Projétil 2 colhido da arma I.

Outro fator digno de nota é a diferença de iluminação entre algumas amostras causada, principalmente, pelo estado de oxidação do metal que reveste o projétil. Essa diferença é uma componente em baixa frequência que não influencia no resultado final da análise, como será demonstrado adiante. É importante ressaltar que esse resultado já permite ao Perito fazer a com-



Figura 5.3: Projétil 1 colhido da arma II.



Figura 5.4: Projétil 2 colhido da arma II.

paração entre as amostras e armazená-las em um banco de dados para comparações futuras. É possível também enviar essa imagem para outro Perito, utilizando as redes de comunicação existentes. Já a comparação automática das imagens é mostrada na seção seguinte.



Figura 5.5: Projétil 1 colhido da arma III.



Figura 5.6: Projétil 2 colhido da arma III.



Figura 5.7: Projétil 1 colhido da arma IV.



Figura 5.8: Projétil 2 colhido da arma IV.



Figura 5.9: Projétil 1 colhido da arma V.



Figura 5.10: Projétil 2 colhido da arma V.



Figura 5.11: Projétil 1 colhido da arma VI.



Figura 5.12: Projétil 2 colhido da arma VI.



Figura 5.13: Projétil 1 colhido da arma VII.


Figura 5.14: Projétil 2 colhido da arma VII.

### 5.2 Resultados das análises das correlações

Cada par de amostras foi submetido às seguintes análises:

- Função de Auto-Correlação no campo A de cada amostra
- Função de Correlação Cruzada entre os campos A e B de cada amostra
- Função de Correlação Cruzada entre o campo A da amostra 1 e o campo A da amostra 2
- Função de Correlação Cruzada entre o campo B da amostra 1 e o campo B da amostra 2
- Função de Correlação Cruzada entre o campo A da amostra 1 e o campo B da amostra 2
- Função de Correlação Cruzada entre o campo B da amostra 1 e o campo A da amostra 2

As análises dos resultados serão feitos para cada um dos pares de amostras e se baseiam na compreensão da Função de Correlação Cruzada. Se dois projéteis foram propelidos pela mesma arma, espera-se que o resultado da FCC da comparação entre esses projéteis tenha como característica marcante a presença de um pico destacado no sinal, correspondente ao atraso onde foi observada a maior semelhança entre eles. Este resultado é equivalente á análise utilizando o microcomparador óptico, feita pelo Perito. Assim, para que um resultado seja considerado positivo, é necessário que se consiga identificar nas comparações entre os sinais obtidos, o pico destacado de correlação, indicativo do sincronismo entre os sinais. Além disso, é necessário que esse resultado seja consistente, ou seja, se apresente no mesmo atraso nas quatro análises feitas (Campo A x Campo A, Campo B x Campo B, Campo A x Campo B, Campo B x Campo A). Também é importante que haja apenas um pico destacado, indicando semelhança dos sinais em apenas um ponto. A presença de dois ou mais picos não tem significado lógico para a correlação entre dois projéteis pois, a rigor, o projétil passa pelo cano apenas uma vez. Desta forma, resultados negativos esperados são a ausência de um pico destacado nas correlações entre as amostras, a presença de picos destacados, porém sem consistência em outros campos ou em atrasos diferentes ou, ainda, a presença de mais de um pico destacado de correlação. A proximidade deste pico com a referência estabelecida é um fator adicional de análise, porém não é excludente.

#### 5.2.1 Arma I

Os resultados obtidos para a Arma I são apresentados na Figura 5.15. Nessa análise, nota-se um excelente resultado para as FCC's entre os campos A e B de cada amostra. Quando feita a comparação entre os campos A das amostras, percebe-se uma redução significativa no valor máximo da FCC, porém o pico de correlação ainda é percebido, atingindo o valor de referência estabelecido com base nas FCC entre os campos das amostras. O mesmo ocorre para o resultado da comparação das amostras no Campo B, cujo máximo de correlação também atinge o valor de referência, com a curva apresentando um pico de correlação. Vale ressaltar que, em ambos os casos, o atraso observado relativo ao pico de correlação é o mesmo, demonstrando coerência no resultado. Já a comparação para o campo A do projétil 1 com o campo B do projétil 2 mostra uma redução mais significativa ainda no valor máximo de correlação, porém ainda foi mantido o formato com pico de correlação no mesmo atraso que nos casos anteriores. O mesmo pico no mesmo atraso também foi observado, com maior magnitude, na comparação entre o



Figura 5.15: Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas da Arma I.

campo B do projétil 1 e o campo A do projétil 2. Tais resultados demonstram que ambos os projéteis foram propelidos pela mesma arma. A análise visual entre os projéteis leva ao mesmo resultado mostrado na Figura 5.16.

#### 5.2.2 Arma II

Os resultados apresentados na Figura 5.17 para a Arma II se apresentaram próximos aos apresentados para a Arma I com algumas diferenças. Na



Figura 5.16: Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma I.

comparação entre os campos A e B do projétil 1, observou-se que o pico de correlação era mais largo, ocorrendo em mais de um atraso, com maior espalhamento da base. Tal resultado demonstra que a amostra colhida possuia estriamentos muito largos, o que contribi para o espalhamento do resultado da FCC entre dois campos. Esta característica não é boa qualidade para a comparação, o que se confirmou nos resultados obtidos que, embora também apresentassem os picos de correlação, não definiam em qual atraso tal correlação acontecia. A análise visual é apresentada na Figura 5.18, onde se constata que, realmente, os estriamentos do projétil 1 reamente são mais largos.

#### 5.2.3 Arma III

Os resultados apresentados para a Arma III, mostrados na Figura 5.19, também demonstraram a correlação elevada entre as amostras. Nota-se, novamente, que uma das amostras (Amostra 2) apresentou estriamentos mais



Figura 5.17: Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas da Arma II.

largos, que resultaram em maior largura do pico de correlação dos campos desta amostra, bem como na comparação entre as amostras. Apesar disso, em todas as análises o resultado se mostrou consistente, com o ponto central do pico de correlação coincidindo sempre no mesmo atraso, demonstrando o resultado positivo. Veja a comparação visual entre as amostras na Figura 5.20.



Figura 5.18: Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma II.

#### 5.2.4 Arma IV

A Figura 5.21 mostra que, na comparação entre os campos A e B de cada amostra, individualmente o valor do pico de correlação não foi muito alto. Entretanto, confrontando as amostras, percebeu-se, nas comparações entre os campos A das amostras e na comparação entre os campos B das amostras, um excelente resultado, superior até mesmo á comparação entre os campos A e B de cada amostra. Já a comparação entre o campo A do projétil 1 e o campo B do projétil 2, não apresenta um resultado nítido, porém na comparação entre o campo B do projétil 1 com o campo A do projétil 2, o resultado é um pico nítido de correlação, demonstrando resultado positivo. Isso pode ser visualizado na Figura 5.22.



Figura 5.19: Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas da Arma III.

#### 5.2.5 Arma V

Novamente, a presença de estriamentos mais grossos ocasionou o espalhamento do pico de correlação, porém sem prejuízos para a análise, mostrada na Figura 5.23. As respostas para a FCC entre os campos A dos projéteis e entre o campo A do projétil 1 e campo B do projétil 2 apresentaram um resultado regular. Já a FCC entre o campo B dos projéteis bem como entre o campo B do projétil 1 e campo A do projétil 2 apresentaram um pico



Figura 5.20: Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma III.

evidente no mesmo atraso, o que indica que o resultado foi positivo para a coincidência entre as amostras. Neste caso, para maior segurança seria necessária uma análise mais apurada do Perito, efetuando-se a comparação visual entre as amostras, conforme apresentada na Figura 5.24.

#### 5.2.6 Arma VI

A Amostra 2 do projétil 6 também apresentou estriamentos mais largos, que influenciaram no formato do pico de correlação para a comparação entre os campos dessa amostra, mostrado na Figura 5.25. Ainda, a baixa amplitude dos picos de correlação observados nas comparações entre as amostras, associadas aos diferentes atrasos em que foram observados, colocaria este resultado como Negativo. Neste caso, a análise visual permite uma conclusão mais nítida, conforme verifica-se na Figura 5.26.



Figura 5.21: Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas da Arma IV.

#### 5.2.7 Arma VII

Nota-se na Figura 5.27 que, em todos os testes, as amostras coletadas da Arma VII foram as que apresentaram os melhores resultados. Todas as análises evidenciaram picos de correlação no mesmo atraso, com aspecto muito semelhante ao obtido para a comparação entre campos diferentes do mesmo projétil. Este caso não deixa dúvidas de que se tratam de amostras produzidas pela mesma arma, como se nota também na análise comparativa



Figura 5.22: Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma IV. visual da Figura 5.28.



Figura 5.23: Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas da Arma V.



Figura 5.24: Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma V.



Figura 5.25: Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas da Arma VI.



Figura 5.26: Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma VI.



Figura 5.27: Resultado das análises de correlação para as amostras colhidas da Arma VII.



Figura 5.28: Comparação visual entre as amostras colhidas da Arma VII.

# 5.3 Resultados de comparações entre amostras de armas diferentes

Para verificar a robustez do sistema quanto a erros, foram feitos testes entre amostras de armas diferentes para que fosse possível determinar a existencia de resultados "falsos positivos". Esperava-se que não ocorressem os picos de correlação sincronizados no mesmo atraso para as amostras, que seriam interpretados erroneamente como casos de similaridade dos estriamentos.

### 5.3.1 Amostra 2 da arma VI comparada com a amostra 1 da arma III

Observando, na Figura 5.29, os resultados para a FCC entre os Campos A das amostras e entre o Campo B da amostra 1 e Campo A da amostra 2, não é percebido o pico de correlação. Entretanto, na comparação entre os Campos B das amostras e entre o Campo A da da amostra 1 e o Campo B da amostra 2, percebe-se nitidamente um pico de correlação elevado. Tal pico levaria à conclusão de um resultado "falso positivo" e se deve à presença de duas linhas muito semelhantes entre as amostras. Neste caso, o Perito iria analisar a comparação visual das amostras, observada na Figura 5.30, e concluir que se tratam de projéteis propelidos por armas diferentes. Na Figura 5.30, as setas indicam as linhas que influenciaram no resultado "falso positivo".



5.3. RESULTADOS DE COMPARAÇÕES ENTRE AMOSTRAS DE ARMAS DIFERENTES

75

Figura 5.29: Resultado das análises de correlação para a amostra 2 da arma VI comparada com a amostra 1 da arma III.

### 5.3.2 Amostra 2 da arma V comparada com a amostra 1 da arma VII

De maneira diferente do obtido no teste anterior, a comparação entre as amostras das armas V e VII não apresentaram nenhum pico evidente de correlação, o que classificaria tais amostras como não produzidas pela mesma arma. Isto pode ser visualizado na Figura 5.31 e a comparação visual é mostrada na Figura 5.32.



Figura 5.30: Comparação visual entre a amostra 2 da arma VI e a amostra 1 da arma III.

### 5.3.3 Amostra 1 da arma III comparada com a amostra 2 da arma I

Os resultados para a comparação entre a amostra 1 da arma III com a amostra 2 da arma I é apresentada na Figura 5.33. Mais uma vez, observase que não ocorreu o pico de correlação entre as amostras, justamente por terem sido produzidas por armas diferentes. A forma das curvas obtidas em nada lembra aquelas que demonstram o resultado positivo. Desta forma a correlação entre estas amostras seria descartada. A comparação visual, mostrada na Figura 5.34, leva à mesma conclusão.



5.3. RESULTADOS DE COMPARAÇÕES ENTRE AMOSTRAS DE ARMAS DIFERENTES

77

Figura 5.31: Resultado das análises de correlação para a amostra 2 da arma V comparada com a amostra 1 da arma VII.

### 5.3.4 Amostra 1 da arma I comparada com a amostra 2 da arma II

De maneira semelhante aos resultados para a comparação entre a amostra 1 da arma III com a amostra 2 da arma I, não foram observados os picos evidentes de correlação, conforme se comprova na Figura 5.35. Este é mais um resultado onde se vê nitidamente que as amostras não foram produzidas pela mesma arma. A comparação visual, mostrada na Figura 5.36, leva à



Figura 5.32: Comparação visual entre a amostra 2 da arma V e a amostra 1 da arma VII.

mesma conclusão.

# 5.3.5 Amostra 1 da arma IV comparada com a amostra 2 da arma VII

Os resultados obtidos para essa comparação, mostrados na Figura 5.37, apresentam características semelhantes às na análise anterior. Novamente, observando a comparação visual (Figura 5.38), percebe-se que as amostras não foram produzidas pela mesma arma.



5.3. RESULTADOS DE COMPARAÇÕES ENTRE AMOSTRAS DE ARMAS DIFERENTES

79

Figura 5.33: Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma III comparada com a amostra 2 da arma I.

# 5.3.6 Amostra 2 da arma V comparada com a amostra 1 da arma VI

Mais uma vez observa-se a ausência de picos de correlação nos resutados, mostrados na Figura 5.39. A comparação visual é apresentada na Figura 5.40.



Figura 5.34: Comparação visual entre a amostra 1 da arma III e a amostra 2 da arma I.

# 5.3.7 Amostra 1 da arma VI comparada com a amostra 1 da arma III

O resultado (Figura 5.41) é semelhante aos anteriores. Nota-se a ausência de picos de correlação nos gráficos. A comparação visual é apresentada na Figura 5.42. Observa-se que já foi feita a comparação da Amostra 2 da arma VI com a Amostra 1 da arma III, mostrada na Seção 5.3.1, que apresentou resultados bem diferentes, demonstrando que aquela análise realmente foi influenciada pela presença das linhas citadas.



5.3. RESULTADOS DE COMPARAÇÕES ENTRE AMOSTRAS DE ARMAS DIFERENTES

Figura 5.35: Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma I comparada com a amostra 2 da arma II.

# 5.3.8 Amostra 2 da arma IV comparada com a amostra 1 da arma III

Este é outro resultado onde se nota a ausência de picos evidentes de correlação, conforme mostrado na Figura 5.43. A comparação visual é apresentada na Figura 5.44.



Figura 5.36: Comparação visual entre a amostra 1 da arma I e a amostra 2 da arma II.

### 5.3.9 Amostra 1 da arma VII comparada com a amostra 2 da arma I

Os resultados, mostrados na Figura 5.45, mostram não um mas vários picos de correlação entre as amostras. Conforme mencionado anteriormente, esse resultado demonstra que as amostras foram produzidas por armas diferentes. Mesma conclusão é obtida analisando a comparação visual entre as amostras (Figura 5.46).

### 5.3.10 Amostra 1 da arma VII comparada com a amostra 2 da arma VI

A Figura 5.47 apresenta os resultados para esta análise. Observa-se que nas comparações entre os Campos A e entre os Campos B das amostras,



5.3. RESULTADOS DE COMPARAÇÕES ENTRE AMOSTRAS DE ARMAS DIFERENTES

Figura 5.37: Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma IV comparada com a amostra 2 da arma VII.

ocorre apenas um pico evidente de correlação em cada, porém o atraso onde o pico é observado é diferente. O mesmo ocorre na comparação entre o Campo A da amostra 1 da Arma VII e o Campo B da amostra 2 da Arma VI, onde o pico de correlação ocorre em atraso diferente dos dois anteriores. Esse resultado somente já leva à conclusão de que se tratam de amostras produzidas por armas diferentes. A comparação entre Campo B da amostra 1 da Arma VII e o Campo A da amostra 2 da Arma VI, mostram não um



Figura 5.38: Comparação visual entre a amostra 1 da arma IV e a amostra 2 da arma VII.

mas vários picos de correlação entre as amostras, reforçando o resultado demonstrado nas outras comparações. A comparação visual entre as amostras está disponível na Figura 5.48.



Figura 5.39: Resultado das análises de correlação para a amostra 2 da arma V comparada com a amostra 1 da arma VI.



Figura 5.40: Comparação visual entre a amostra 2 da arma V e a amostra 1 da arma VI.



Figura 5.41: Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma VI comparada com a amostra 1 da arma III.



Figura 5.42: Comparação visual entre a amostra 1 da arma VI e a amostra 1 da arma III.



Figura 5.43: Resultado das análises de correlação para a amostra 2 da arma IV comparada com a amostra 1 da arma III.



Figura 5.44: Comparação visual entre a amostra 2 da arma IV e a amostra 1 da arma III.



Figura 5.45: Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma VII comparada com a amostra 2 da arma I.



Figura 5.46: Comparação visual entre a amostra 1 da arma VII e a amostra 2 da arma I.


Figura 5.47: Resultado das análises de correlação para a amostra 1 da arma VII comparada com a amostra 2 da arma VI.



Figura 5.48: Comparação visual entre a amostra 1 da arma VII e a amostra 2 da arma VI.

## 5.4 Discussão dos resultados

Observando todos os resultados obtidos, tanto entre amostras de projéteis colhidos das mesmas arma e colhidos de armas diferentes, percebe-se que a captura e montagem da imagem se deu de maneira correta e o método de comparação se mostrou coerente. Para as amostras de projéteis colhidos da mesma arma, os melhores resultados obtidos foram aqueles gerados pela Arma VII. Nesse caso, as curvas apresentaram pequena dispersão em torno do ponto de maior correlação. Notou-se, também, que nos casos em que a comparação entre campos diferentes do mesmo projétil se mostrava com baixos valores de correlação, o mesmo resultado foi obtido para a comparação entre este projétil e o outro gerado pela arma. De maneira geral, a comparação entre campos diferentes da mesma amostra se mostrou como uma referência válida para a comparação com outras amostras. No caso das amostras da Arma V, que foram aqueles em que a correlação foi menos evidente, observou-se que isso foi decorrente da pior qualidade das amostras, constatada também na comparação visual.

Já para o caso de amostras obtidas a partir de armas diferentes, apenas um caso apresentou o pico de correlação evidente, entretanto, em todos os outros, os resultados apresentados ou não mostravam o pico de correlação evidente, ou apresentavam mais de um pico de correlação, evidenciando que não se tratavam de amostras produzidas pela mesma arma.

## Capítulo 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

"Mas prove cada um seu labor e, então, terá motivo de gloriar-se unicamente em si e não em outro."

Gálatas, 6:4

Este trabalho iniciou-se como o embrião de um sistema automatizado de microcomparação balística. A revisão bibliográfica mostrou a evolução da ciência balística desde os primórdios das armas de fogo até os dias atuais, apresentando as soluções já existentes, tanto para a comparação visual de estriamento quanto para outras soluções computacionais. Em seguida, foram apresentados os desafios para a captura e comparação das imagens. O primeiro ponto crítico foi extrair uma imagem bidimensional de um objeto tridimensional. A solução foi implementar um hardware que girava o projétil em torno do seu próprio eixo e fotografava uma faixa da área lateral desse projétil. Foi desenvolvido um software para trabalhar junto com o hardware desenvolvido, que comandava a sequência de operação e fazia a união das imagens obtidas, alcançando o resultado da maneira esperada.

A comparação das imagens foi um desafio à parte, uma vez que era necessário estabelecer um método confiável para encontrar as semelhanças entre as amostras. A Função de Correlação Cruzada mostrou-se um método adequado para determinar o grau de semelhança entre as amostras e os resultados obtidos demonstraram quais haviam sido produzidas pela mesma arma. Já aquelas amostras produzidas por armas diferentes também puderam ser determinadas pela interpretação do resultado da Função de Correlação Cruzada.

Observando os resultados obtidos nos ensaios práticos e com base no conhecimento criminalístico de balística forense, foi possível concluir que o sistema apresentado mostrou resultados favoráveis à captura das imagens de projéteis propelidos por armas de fogo e ao confronto dessas imagens entre si, para verificar a coincidência de padrões balísticos.

A captura das imagens, embora implementada com uma lente que não possuía o recurso de ajuste automático de foco, mostrou-se eficiente, sendo capaz de fotografar o projétil em diversos pontos e unir as imagens resultantes de maneira homogênea, com poucos pontos de divergência e com padrão de iluminação constante. Em muitos casos foi necessária a ampliação em muitas vezes para se identificarem os pontos de união entre os quadros, o que evidencia a eficiência do algorítimo de determinação de fluxo óptico e concatenação das imagens.

Para que o sistema de aquisição de imagens seja melhorado faz-se necessária uma lente com maior capacidade de ampliação e ajuste automático de foco. Com essa lente, os microestriamentos mais finos poderão ser analisados, trazendo uma nova gama de informações para o confronto balístico e melhorando o desempenho do sistema. Em que pese não ter alterado a identificação dos pontos chave, o ajuste automático de foco é uma necessidade premente, pois evitará as discrepâncias de foco observadas em algumas imagens, que levaram à fácil identificação dos pontos de união.

Quanto ao método de comparação entre as amostras, para aquelas de boa qualidade, o sistema foi capaz de apontar os casos em que houve a semelhança entre os microestriamentos, evidenciada pelo valor máximo do resultado da função de correlação cruzada associado ao formato da resposta desta função de correlação, determinando apenas um atraso máximo. Espera-se que com a melhoria da qualidade das imagens a análise de correlação apresente-se mais precisa e confiável.

Em que pese os bons resultados nos testes de padrões de armas diferentes, o sistema proposto evita apenas a ocorrência de resultados "falsos positivos", evitando que amostras não relacionadas sejam atribuídas à mesma arma. A ocorrência de "falsos negativos", cujos padrões tenham sido produzidos pela mesma arma, é um resultado comum nos laboratórios de balística forense, mesmo nos casos em que exames de microcomparação balística são efetuados pelos especialistas que, muitas vezes, não conseguem identificar pontos de semelhança, pela baixa qualidade das amostras de referência ou dos padrões colhidos da arma. Ora, uma vez que nem mesmo o especialista, com toda a capacidade de raciocínio, não consegue evitar os resultados "falsos negativos", não é de se estranhar que o equipamento, muito mais limitado, também não o consiga.

O presente trabalho deu origem a uma publicação em congresso nacional:

 Silvino Jr,J.B., "Comparação de microestriamentos de projéteis propelidos por arma de fogo utilizando Função de Correlação Cruzada- XX Congresso Brasileiro de Criminalística. João Pessoa/Outubro de 2009.

Também com o trabalho e conhecimentos adquiridos durante a pesquisa, foi possível fazer a implantação de um sistema de banco de dados balístico de origem russa, denominado Evofinder, no laboratório de Balístitica Forense do Instituto de Criminalística da Polícia Civil de Minas Gerais. A implantação deste banco de dados ensejou também a participação em seminário nacional:

• Silvino Jr, J.B., "Resultados preliminares do Sistema de Banco de Dados

Balístico - EVOFINDER-- VI Seminário Nacional de Balística Forense. Goiânia/Agosto de 2008.

As vantagens do sistema desenvolvido são as seguintes:

- Sistema com hardware simples e de fácil implementação;
- Algorítimo rápido e eficiente para união das imagens para formação da esteira da área lateral;
- Captura das imagens com o mínimo de interferência do operador;
- Não necessidade de marcações ou identificações na imagem, diferentemente dos sistemas já existentes;
- Aplicação da mesma metodologia para vários calibres ou tipos de raiamentos sem grandes alterações de hardware ou software.

Não obstante as vantagens elencadas, foram observadas também algumas desvantagens:

- Ampliação insuficiente da lente, que não permitia capturar com nitidez os microestriamentos mais finos;
- Sistema manual de foco da imagem, limitando a qualidade obtida;
- Método de apresentação dos resultados ainda inadequado para um operador que não tenha conhecimentos matemáticos e/ou não compreenda a função de correlação cruzada;
- Necessidade de comparação das imagens em mais de um campo da mesma amostra.

As desvantagens acima elencadas podem ser sanadas em trabalhos futuros, que procurem aperfeiçoar o sistema ora iniciado. Uma vez que o sistema proposto é a base para o desenvolvimento de um equipamento mais completo, as propostas para trabalhos que possam dar continuidade para a pesquisa em tela são as seguintes:

- Utilização de uma lente com maior capacidade de aumento, da ordem de 15 a 20 vezes, visando capturar mais detalhadamente os microestriamentos, possibilitando confrontos mais precisos;
- Substituição da lente de foco manual para uma lente com foco ajustável eletronicamente e implementação de um sistema de autofoco para cada imagem obtida;
- Reavaliação quanto a necessidade de análise de correlação em mais de um campo do projétil, uma vez obtidas imagens com maior aumento e definição;
- Implementação de um sistema de determinação automática do número, inclinação e largura das raias para o desenvolvimento de um sistema acessório de identificação de armas a partir do raiamento do projétil;
- Desenvolvimento de um sistema de comparação de estojos que funcione juntamente com o sistema de comparação de projéteis;
- Estabelecimento de uma estrutura de banco de dados para armazenamento das amostras, identificação e busca automática daquelas correlacionadas com a amostra pesquisada.

## **Referências Bibliográficas**

- [Aguirre, 2004] Aguirre, L. A. (2004). Introdução à Identificação de Sistemas. Editora UFMG, 2 edition.
- [Biasotti, 1959] Biasotti, A. A. (1959). A statistical studyof the individual characteristics of fired bullets. *Ninth Annual Meeting of the American Academy of Forensic Sciences*, pages 34–50.
- [Chant, 1995] Chant, C. (1995). The New Encyclopedia of Handguns & Small Arms. Prion, 1 edition.
- [C.L.Smith and J.M.Cross, 1995] C.L.Smith and J.M.Cross (1995). Optical imaging techniques for ballistics specimens to identify firearms. Security Technology. Proceedings. IEEE 29th Annual 1995 International Carnahan Conference, 18(20):275–289.
- [Cordioli, 2003] Cordioli, C. (2003). A criminalística brasileira sua doutrina. XVII Congresso Nacional de Criminalística.
- [Cruz, 1998] Cruz, J. C. G. (1998). Identificação de uma torre de retificação de Águas Ácidas usando redes neurais artificiais. Universidade Federal de Minas Gerais. (Dissertação de mestrado, PPGEE).
- [de Oliveira Júnior, 1998] de Oliveira Júnior, J. J. (1998). Sistema de processamento digital de imagens para fins didático-científicos: Estudo, seleção e implementação de algoritmos de filtragem espacial. Relatório Final de Iniciação Científica - UFPB.
- [Diehl and Bacchi, 2006] Diehl, D. and Bacchi, M. R. P. (2006). Relações de preços nos mercados interno e internacional de soja e derivados. XLIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural.
- [Hamby and Thorpe, 1999] Hamby, J. E. and Thorpe, J. W. (1999). The history of firearm and toolmark identification. *The Association of Firearm* and Tool Mark Examiners Journal, 31:266–284.

- [Heizman and León, 2003] Heizman, M. and León, F. P. (2003). Imaging and analysis of forensic striation marks. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 42(12):3423–3432.
- [Hohreiter et al., 2002] Hohreiter, V., Wereley, S. T., Olsen, M. G., and Chung, J. N. (2002). Cross-correlation analysis for temperature measurement. *Institute of Physics Publishing Measurement Science and Techno*logy, 13:1072–1078.
- [Kohl et al., 2002] Kohl, T., Heinze, K. G., Kuhlemann, R., Koltermann, A., and Schwille, P. (2002). A protease assay for two-photon crosscorrelation and fret analysis based solely on fluorescent proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(19):12161–12166.
- [Kou et al., 1994] Kou, C., Tung, C.-T., and H.C.FU (1994). Fisofm: Firearms identification based on sofm model of neural network. Security Technology. Proceedings. IEEE 28th Annual 1994 International Carnahan Conference, pages 120–125.
- [Kreutz and Olpel, 1996] Kreutz, M. and Olpel, B. V. (1996). Scale-invariant image recongnition based on higher order autocorrelation features. *Pattern Recognition*, 29.
- [León, 2006] León, F. P. (2006). Automated comparison of firearm bullets. Forensic Science International, 156:40–50.
- [Li, 2006] Li, D. (2006). Ballistics projectile image analysis for firearm identification. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(10):2857–2865.
- [Lowe, 2004] Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scaleinvariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 60(2):91– 110.
- [L.Smith et al., 2000] L.Smith, C., Robinson, M., and Evans, P. (2000). Line-scan imaging for the positive identification of ballistics specimens. Security Technology. Proceedings. IEEE 34th Annual 2000 International Carnahan Conference, pages 269–275.
- [Martinez, 1997] Martinez, J. M. (1997). Armas Ligeiras de Fogo. Edições Del Prado, 1 edition.
- [Nichols, 2006] Nichols, R. (2006). Defending the scientific foundations of firearms and tool mark identification discipline: A response to recent challenges. *Forensic Science International*, 52:586–594.

- [Rabello, 1995] Rabello, E. (1995). *Balística Forense*. Sagra Luzzatto, 3 edition.
- [Schwartz, 2005] Schwartz, A. (2005). A systemic challenge to the realibility and admissibility of firearms and toolmark identification. *The Columbia Science and Technology Law Review*, VI.
- [Thews et al., 2005] Thews, E., Gerken, M., Eckert, R., Zäpfel, J., Tietz, C., and Wrachtrup, J. (2005). Cross talk free fluorescence cross correlation spectroscopy in live cells. *Biophysical Journal*, 89:2069–2076.
- [Tocchetto, 2005] Tocchetto, D. (2005). Balística forense: aspectos técnicos e jurídicos. Editora Millenium, 4 edition.
- [Zographos et al., 1997] Zographos, A., Robinson, M., and Evans, J. (1997). Ballistics identification using line-scan imaging techniques. Security Technology. Proceedings. IEEE 31st Annual 1997 International Carnahan Conference, pages 82–87.