



Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

**Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica Energia e
Automação**



Ferramenta Computacional para Medição de Deslocamentos em Ensaios de Carga através de Técnicas de Processamento de Imagem

HELDER GONÇALVES FERNANDES
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação de Mestrado para a Obtenção de Grau de Mestre em Engenharia
Eletrotécnica - Ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientadores:

Professora Maria da Graça Vieira de Brito Almeida
Professor Armando José Leitão Cordeiro

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto
Vogal-Arguente: Professor Doutor Fernando Manuel Fernandes Melicio

Julho de 2016

Dissertação realizada sob orientação de:

Professora Maria da Graça Vieira de Brito Almeida

Professora da Área Departamental
de Engenharia Eletrotécnica Energia e Automação

Professor Armando José Leitão Cordeiro

Professor da Área Departamental
de Engenharia Eletrotécnica Energia e Automação

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores por todo o apoio demonstrado ao longo da realização desta dissertação, assim como por todo o material de estudo fornecido para a realização da mesma. Um especial agradecimento à professora Graça Almeida pelo acompanhamento e dedicação que manteve ao longo de todo este processo.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica agradeço a disponibilização do equipamento para realização de ensaios práticos de tração, em particular ao Professor Afonso Leite pela disponibilidade demonstrada, apoio e acompanhamento dos ensaios.

Resumo

A realização desta dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, que permita a medição de deslocamentos de uma amostra de um determinado material a analisar (região de interesse - ROI) em um ensaio em carga estático através de processamento de imagem.

A ferramenta computacional implementada permite, recorrendo a uma câmara fotográfica (com resolução tanto maior quanto mais precisa se pretenda que seja a medida) e um computador com o *software* “MATLAB®”, efetuar a medida de deslocamentos através do processamento da informação presente numa imagem original e comparando-a com a sequência de imagens que traduzem o movimento do material ao longo do ensaio.

A solução adotada, contrariamente aos ensaios tradicionais, caso ocorra algum comportamento não programado (roturas, flexões não previstas em outras regiões, etc...) toda a região da amostra do material se encontra monitorizada e poderá voltar a ser analisada bastando para isso selecionar uma nova ROI. Esta solução poderá também ser menos dispendiosa, visto evitar a utilização de extensómetros e outros consumíveis usados nos ensaios tradicionais (equipamentos descartáveis). O método proposto através de processamento de imagem, por ser não invasivo, apresentará uma menor influência externa no comportamento da amostra a analisar.

Muitas são as técnicas de processamento e manipulação de imagens digitais, assim como os algoritmos para deteção de movimentos através desse mesmo processamento, dos quais foram selecionados para implementação da ferramenta desenvolvida o *Adaptive rood pattern search* (ARPS) e o *Horn/Schunck* (HS). As imagens são divididas em blocos e por cada bloco é calculada a sua função de custo. A ideia base é procurar na imagem corrente o bloco que mais se aproxime do mesmo bloco da imagem anterior. O primeiro algoritmo é um algoritmo de correspondência de blocos (*block matching*) e o segundo é um algoritmo diferencial.

Por forma a validar a ferramenta desenvolvida, pretende-se comparar os dados de deslocamento calculados através de processamento de imagem com os registados através de métodos tradicionais.

Palavras-chave: Deslocamentos, ensaio de carga estático, processamento de imagem, MATLAB®, ARPS, Horn/Schunck

Abstract

The main subject of this thesis was the development of a computational tool that should be able to measure the displacement of a sample from a specific material (region of interest – ROI) in a static load test by performing image processing technics.

Using a high definition camera and a computer working with the “MATLAB®” software, the tool should be able to measure the displacements between a reference image and a sequence of images which represents movements of each material or region along time.

In spite of analyzing only a specific region of an image as a traditional methods does, this solution will be looking at the entire object. So, if some event occurs (ruptures, abnormal evolution of the displacements, etc.) it will be easy to analyze the specific region, simply by selecting a new ROI.

This solution it may also be cheaper because it use less hardware and disposals components when compared with the traditional methods. Furthermore the image processing method tend to have less disturbance because there is no contact between the sample and the tool, so we will have less external influence.

There are many image processing technics as well algorithms to detect and measure the displacements. In this work it was selected and implemented the Adaptive rood pattern search (ARPS) and Horn/Schunck (HS) algorithm to perform the tool.

In the ARPS algorithm, each ROI is divided by blocks. The target block in the current image is the one who has the minimum cost function when compared with the reference image. This action is perform for each block of the region of interest. The first algorithm is a block matching method and the second is a differential method. In order to validate the performed tool, it will be compared the data obtained by using the image processing method with the traditional methods.

Keywords: displacements, static load test, Image processing, MATLAB®, ARPS, Horn/Schunck

,

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Acrónimos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	2
1.2 Objetivos	4
1.3 Organização do trabalho	4
1.4 Notação	5
2 Processamento de imagem digital	7
2.1 Estado de arte	8
2.2 Conceitos básicos de aquisição de imagem	12
2.2.1 Princípio da formação de uma imagem	13
2.2.2 Aquisição de uma imagem e respetiva conversão analógica/digital	15
2.2.2.1 Resolução de intensidade de brilho	17
2.2.2.2 Resolução espacial	19
2.2.3 Armazenamento de uma imagem digital	20
2.2.3.1 Formatos de compressão de uma imagem digital	21
2.2.3.2 Formatos de compressão de vídeo digital	21
2.3 Aplicações associadas ao processamento de imagem	22
2.3.1 Aplicações de visão computacional	23
2.3.2 Aplicações de visão humana	23
2.3.3 Análise e processamentos da imagem digital	23
2.3.3.1 Leitura das características base de uma imagem	24
2.3.3.2 Manipulação ponto a ponto de uma imagem	24
2.3.3.3 Conversão de uma imagem	28
2.3.3.4 Filtragem no domínio espacial	30
2.3.3.4.1 Filtros passa-baixo ou de suavização	33
2.3.3.4.2 Filtros passa-alto ou de acentuação	36
2.3.3.5 Segmentação de uma imagem e operadores morfológicos	39
2.3.3.6 Reconhecimento de objetos e respetivas características	41
3 Algoritmos de procura utilizados em deteção de movimento	43
3.1 Algoritmos de deteção e estimativa de movimento	44
3.1.1 Algoritmos baseados em métodos de correspondência de blocos	45
3.1.1.1 Procura exaustiva (<i>Exhaustive Search (ES)</i>)	47
3.1.1.2 Procura por três passos (<i>Three Step Search (TSS)</i>)	47
3.1.1.3 Algoritmo de padrão cruzado adaptável (<i>Adaptive Rood Pattern Search (ARPS)</i>)	48
3.1.2 Algoritmos baseados em métodos diferenciais	50
3.1.2.1 Algoritmo Horn e Schunck	52
3.1.2.2 Algoritmo Lucas e Kanade	53
3.1.2.3 Algoritmo Nagel	53
4 Ferramenta desenvolvida para medição de deslocamentos	55

4.1	Programa utilizado.....	56
4.2	Características da ferramenta computacional desenvolvida.....	56
4.2.1	Organização da estrutura do programa.....	56
4.2.2	Resumo das principais funções da ferramenta desenvolvida	56
4.2.3	Fluxograma do programa.....	59
5	Casos de estudo.....	69
5.1	Estudo de casos.....	70
5.1.1	Ensaios de tração realizados no âmbito desta dissertação	70
5.1.1.1	Ensaio 1 – Ensaio realizado com provete de polímero	71
5.1.1.2	Ensaio 2 – Ensaio realizado com provete de acrílico	75
5.1.1.3	Ensaio 3 – Ensaio realizado com provete de PVC.....	77
5.1.2	Ensaio de compressão/flexão realizado.....	80
5.1.2.1	Ensaio 4 – Ensaio realizado com provete de acrílico	80
5.1.3	Ensaio teórico com deslocamentos verticais e horizontais.....	83
5.1.3.1	Ensaio 5 – Deslocamento <i>pixel a pixel</i> gerado em Matlab	83
6	Conclusões e investigação futura	89
6.1	Conclusão e investigação futura	90
6.1.1	Conclusão	90
6.1.2	Investigação futura.....	91
	Bibliografia	93
	Anexos	1

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Representação no plano de uma imagem (ou tonalidades) e sua correspondente discretização (adaptado de[6]).	9
Figura 2.2 – Representação da escala de cinzas para uma imagem (adaptado de[9]).	10
Figura 2.3 – Representação de uma imagem a cores (adaptado de[8]).	10
Figura 2.4 – Cadeia genérica de aquisição e processamento de imagem digital (adaptado de[9]).	11
Figura 2.5 – Alguns dos passos fundamentais em processamento de imagem digital (adaptado de[9]).	12
Figura 2.6 – Espectro eletromagnético (adaptado de [43]).	13
Figura 2.7 – Percepção visual humana de um objeto (adaptado de [9]).	14
Figura 2.8 – Matriz de sensores para aquisição de imagem numa lente de camara (adaptado de [8]).	15
Figura 2.9 – Cadeia básica de conversão A/D (adaptado de[10]).	16
Figura 2.10 – Cadeia básica de aquisição de sinal (adaptado de[44]).	16
Figura 2.11 – Aquisição e conversão da imagem para digital (adaptado de [9]).	17
Figura 2.12 – Exemplo de discretização da intensidade de uma imagem a 8 cores (adaptado de [45][6]).	18
Figura 2.13 – Efeito na qualidade da imagem com a redução da resolução de intensidade (de 256 até 2 cores) (adaptado de [9]).	18
Figura 2.14 – Efeito na qualidade da imagem com a redução da resolução espacial. Da esquerda para a direita, projeção do objeto físico, imagem digitalizada segundo resolução espacial x e finalmente uma digitalização da imagem do objeto segundo uma resolução $x/2$ (adaptado de[6]).	19
Figura 2.15 – Efeito na qualidade da imagem com a redução da resolução espacial (adaptado de [9]).	20
Figura 2.16 – Processamento de imagem digital (adaptado de[8]).	22
Figura 2.17 – Exemplo de informação passível de ser recolhida de uma imagem digital.	24
Figura 2.18 – Exemplo de negativo de imagem (adaptado de[13]).	25
Figura 2.19 – Exemplo de normalização de contraste (adaptado de[14]).	26
Figura 2.20 – Exemplo de geração de um histograma.	27
Figura 2.21 – Exemplo de imagem resultante após equalização de um histograma.	27
Figura 2.22 – Exemplo de conversão imagem a cores para tons de cinzentos (média ponderada).	29
Figura 2.23 – Exemplo da imagem convertida em tons de cinzento e da tonalidade monocromática encarnada da imagem original com base num limiar de 50.	30
Figura 2.24 – Exemplo de aplicação de filtro a uma imagem (adaptado de[8]).	32
Figura 2.25 – Exemplo da variação da intensidade do brilho ao longo de uma linha de pixéis de uma imagem (adaptado de[20]).	33
Figura 2.26 – Exemplo de aplicação de filtro da média a imagem em tons de cinzento.	34
Figura 2.27 – Exemplo de aplicação de filtro da mediana a imagem com ruído.	34

Figura 2.28 – Exemplo de aplicação de filtro da moda a imagem com ruído (adaptado de[22]).	35
Figura 2.29 – Exemplo de aplicação de filtro gaussiano (adaptado de[21]).	36
Figura 2.30 – Exemplo da evolução das derivadas espaciais da intensidade de brilho (adaptado de[8]).	37
Figura 2.31 – Exemplo de aplicação de filtro Roberts (adaptado de[20]).	38
Figura 2.32 – Exemplo de aplicação de filtro Sobel (adaptado de[20]).	39
Figura 2.33 – Exemplo de segmentação baseado em semelhanças de tonalidades e em regiões de fronteira (adaptado de[20]).	39
Figura 2.34 – Exemplo de operadores morfológicos básicos (adaptado de[46]).	40
Figura 2.35 – Exemplo de aplicação sequencial de operadores morfológicos básicos para melhoria da percepção de uma impressão digital (adaptado de[9]).	41
Figura 2.36 – Características básicas a identificar em objetos em uma imagem (adaptado de[20]).	42
Figura 3.1 – Exemplo de algoritmo de procura baseado no método de correspondência de blocos (adaptado de[31]).	45
Figura 3.2 – Exemplo de procura por TSS (adaptado de[30]).	47
Figura 3.3 – Exemplo de regiões de suporte para prever o MV. A cinza a região de suporte e bloco com circunferência o bloco atual para o qual se pretende determinar o movimento exato (adaptado de[23]).	49
Figura 3.4 – Exemplo de procura ARPS. A verde o bloco cujo movimento queremos caracterizar.	50
Figura 4.1 – Diagrama de blocos simplificado da organização do programa.	59
Figura 4.2 – Fluxograma da janela de seleção de dados, calibração de camera, definição da ROI.	60
Figura 4.3 – Aspeto visual da janela de seleção de dados, calibração de camera, definição da ROI após preenchimento dos campos obrigatórios.	61
Figura 4.4 – Fluxograma da janela de especificação do algoritmo (exemplo para o ARPS).	62
Figura 4.5 – Aspeto visual da Janela de especificação do algoritmo após preenchimento dos campos obrigatórios.	63
Figura 4.6 – Fluxograma da janela para geração de tabelas.	64
Figura 4.7 – Aspeto visual da Janela para gerar tabelas- a) Aspeto no arranque – b) Aspeto após seleção da opção calculadora e gravação de ficheiro contendo dados do ensaio.	65
Figura 4.8 – Fluxograma da janela para geração de gráficos (para o algoritmo ARPS).	66
Figura 4.9 – Aspeto visual da Janela para gerar gráfico (para o algoritmo ARPS) após seleção da opção para visualizar gráfico de deslocamentos acumulados.	67
Figura 5.1 – Proverte ensaio 1.	71
Figura 5.2 – Proverte ensaio 2.	71
Figura 5.3 – Proverte ensaio 3.	71
Figura 5.4 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.	73
Figura 5.5 – a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostras antes e apos ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.	74
Figura 5.6 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.	76
Figura 5.7 – a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostras antes e apos ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.	77

Figura 5.8 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.	79
Figura 5.9 – a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostra apos ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS	79
Figura 5.10 – Proverte ensaio 4.	80
Figura 5.11 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.	82
Figura 5.12 – a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostra ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.	82
Figura 5.13 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.	86
Figura 5.14 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.	86
Figura 5.15 – Deslocamento vertical a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostra ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.	87
Figura 5.16 – Deslocamento horizontal a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostra ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.	88

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 - Tabela com indicação de características resumidas do ensaio.....	72
Tabela 5.2 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio físico e por processamento de imagem; b) Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.	72
Tabela 5.3 - Tabela com indicação de características resumidas do ensaio.....	75
Tabela 5.4 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio físico e por processamento de imagem; b) Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.	75
Tabela 5.5 - Tabela com indicação de características resumidas do ensaio.....	77
Tabela 5.6 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio físico e por processamento de imagem; b) Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.	78
Tabela 5.7 - Tabela com indicação de características resumidas do ensaio.....	80
Tabela 5.8 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio físico e por processamento de imagem; b) Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.	81
Tabela 5.9 - Tabela com indicação de características resumidas do ensaio.....	83
Tabela 5.10 – Tabela de deslocamentos parciais.....	84
Tabela 5.11 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio físico teórico e por processamento de imagem; b) Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.	85

Acrónimos

Acrónimo	Designação	Designação traduzida
4SS	<i>Four step search</i>	Procura por quatro passos
ADC	<i>Digital to analogue converter</i>	Conversor Analógico/Digital
ARPS	<i>Adaptive rood pattern search</i>	Padrão de Procura em cruz ajustável
AVI	<i>Audio video interleaved</i>	Áudio e vídeo intercalado
b	<i>Background</i>	Pano de fundo
BCCE	<i>Brightness constancy constraint equation</i>	Equação da condição de brilho constante
BMP	<i>Bitmap picture</i>	Imagem de mapa de bits
DS	<i>Diamond search</i>	Procura em padrão diamante
DVD	<i>Digital Video Disc</i>	Disco de vídeo digital
EM	Electromagnetic	Eletromagnético
ES	<i>Exhaustive search</i>	Procura exaustiva
f	<i>Foreground</i>	Primeiro plano
GIF	<i>Graphic interchange format</i>	Formato de troca gráfico
HS	<i>Horn/Schunck</i>	Horn/Schunck
IR	Infrared	Infra vermelho
JPG	<i>Joint photographic experts group</i>	União de especialistas em fotografia
LDSP	<i>Large diamond search pattern</i>	Procura em padrão diamante extenso
LVDT	<i>linear variable differential transformer</i>	Transformador diferencial variável linear
ME	<i>Motion estimation</i>	Deteção de movimento
MOV	<i>Movie (QuickTime file format)</i>	Filme
MSE	<i>Mean square error</i>	Erro médio quadrático
MV	<i>Motion vector</i>	Vetor movimento
NTSS	<i>New three step search</i>	Procura nova por três passos
PC	<i>Personal computer</i>	Computador pessoal
PNG	<i>Portable network graphic</i>	Rede portátil gráfica
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>	Policloreto de vinil
RGB	<i>Red, green, blue</i>	Vermelho, verde, azul

ROI	<i>Region of interest</i>	<i>Região de interesse</i>
SAD	<i>Sum of absolute difference</i>	Somatório do valor absoluto da diferença
SDSP	<i>Small diamond search pattern</i>	Procura em padrão diamante reduzido
SES	<i>Simple and efficient search</i>	Procura simples e eficiente
TIFF	<i>Tagged image file format</i>	Formato de imagem com etiquetas
TSS	<i>Three step search</i>	Procura por três passos
UI	<i>User interface</i>	Interface do utilizador
UV	<i>Ultraviolet</i>	Ultra violeta
WMV	<i>Windows media video</i>	Formato do Windows para multimédia

1

Introdução

Este capítulo apresenta um enquadramento do tema da dissertação e dos objetivos a que se propõe. Breve descrição da estrutura do relatório e respetiva notação utilizada.

1.1 Enquadramento e motivação

Os sistemas sensoriais baseados em aquisição e processamento de imagem estão largamente difundidos na indústria, com especial incidência nas áreas de automação e robótica[1]. Nestes dois ramos da Engenharia Eletrotécnica, estas técnicas de processamento de imagem são utilizadas em controlo de qualidade nas linhas de produção em serie (identificar padrões, medidas dimensionais, contagens, etc...), identificação e separação de peças por lotes, leitura de códigos de barra, armazenagem ou expedição inteligente, deteção de posicionamento de determinados componentes de um robô ou estrutura no processo, entre outras[2][3]. A ideia base desta dissertação será baseada nos conceitos de processamento de imagem e desenvolver uma ferramenta, que nos permita realizar medições de deslocamentos, com especial incidência nos ensaios de carga de tração e compressão, tipicamente realizados em outras áreas de engenharia, às quais os conceitos e teoria de aquisição e processamento de imagem podem não ser utilizados.

Os ensaios de carga em materiais são transversais a muitos ramos de engenharia, com particular incidência em engenharia civil e mecânica. Esses ensaios permitem testar algumas propriedades dos materiais, permitindo uma melhor seleção das suas características com base na aplicação final a que se destinam.

Este tipo de ensaios são também muito comuns em estruturas já existentes, tais como pontes, túneis, barragens, etc..., onde os ensaios de carga aos seus materiais constituintes permitem avaliar o seu estado de conservação e as condições de segurança para os seus utilizadores.

A análise das características mecânicas dos materiais/estruturas resulta da realização de um conjunto de ensaios de carga, dos quais se podem destacar [4]:

- Ensaio de tração
- Ensaio de dobramento
- Ensaio de compressão
- Ensaio de impacto
- Ensaio de embutimento
- Ensaio de flexão

A recolha das amostras, as condições de referência e os procedimentos seguem determinadas normas para cada tipo de ensaio e material em análise. Exemplo disso será a NPEN10002-1 relativa aos ensaios de tração de metais[5].

O deslocamento do material/estrutura em si, no caso dos ensaios de tração, compressão e flexão, é registado tipicamente através de extensómetros, transformadores lineares diferenciais variáveis (LVDT) e/ou células de carga.

No entanto, apesar de se poder prever o movimento ou as localizações dos pontos de rotura na amostra de um dado material, o comportamento poderá ter desvios. No caso dos ensaios de carga destrutivos, caso este fenómeno aconteça, o sensor pode não se encontrar instalado no local onde o fenómeno ocorre, inviabilizando o ensaio, com a perda total da amostra (e alguns consumíveis eletrónicos como é o caso dos extensómetros). Para garantir a total monitorização de uma dada amostra, seria necessário a instalação de vários sensores / células de carga ao longo da mesma. Um outro fator não menos importante é o facto de as resinas adesivas para a instalação dos extensómetros poderem influenciar nos resultados medidos, ou seja, podem apresentar uma aderência ineficiente ou alterar molecularmente a constituição do provete. Estas duas desvantagens dos métodos físicos de medidas convencionais são precisamente as lacunas que o método de medida por processamento de imagem baseado nos conceitos apreendidos em engenharia eletrotécnica vem preencher (ou ultrapassar). Este método é não invasivo e permite, através do correto posicionamento da camera, uma visualização geral da amostra (apresenta-se como um *backup* integral do ensaio).

A realização de ensaios de carga com recurso ao processamento digital de imagem pode exigir que sejam analisadas muitas variáveis de diversas câmaras fotográficas de elevada resolução e em diferentes ângulos, tornando-se por vezes um método elaborado e complexo. O desenvolvimento tecnológico no processamento de imagem digital que ocorreu no último século, aliado à evolução do *hardware* de aquisição de imagem, processamento de dados e às ferramentas computacionais disponíveis permitiram precisamente dar o passo necessário para ultrapassar essa complexidade, permitindo, para além disso, a difusão e reconhecimento das suas inúmeras potencialidades em outras áreas da ciência, das quais se destacam a saúde, indústria, exploração espacial, entre outras [6].

Para além dos ensaios de carga em laboratório, existe um forte potencial na aplicação de técnicas de processamento de imagem digital para determinar as condições de segurança de estruturas tais como pontes, tuneis, edifícios, etc..., medindo continuamente os deslocamentos (desvios) que ocorram relativamente a uma imagem base [7].

Esta dissertação irá incidir precisamente no estudo do deslocamento resultante de um ensaio em carga estático (por flexão e tração). Para tal recorreu-se a imagens adquiridas em laboratório de um ensaio de carga de tração, realizado no laboratório de Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Para cada ensaio foi obtido uma sequência de imagens que ilustram a totalidade do ensaio, desde a não deformação à deformação máxima obtida. Foi igualmente imposto um padrão aleatório com vista a ser mais fácil os algoritmos de processamento de imagem seguirem o deslocamento. Para além deste ensaio, foram utilizadas neste trabalho imagens de ensaio cedido pela orientadora, assim como deslocamentos gerados artificialmente para uma melhor compreensão e determinação das limitações dos algoritmos implementados.

1.2 Objetivos

A realização desta dissertação tem como objetivo principal a elaboração de uma interface gráfico que permita efetuar a medição de deslocamentos de um objeto num ensaio em carga estático de flexão ou tração, recorrendo ao processamento de imagem. Para tal serão implementados dois algoritmos distintos de procura, cujo objetivo será comparar ambos os modelos por forma a obter aquele que apresente menor desvio (menor erro) dos valores registado em ensaios práticos. Cada algoritmo terá também a possibilidade de alteração dos parâmetros característicos de procura associados a cada um o que irá permitir perceber, com base na característica do movimento e padrão do material a analisar, a influência destes parâmetros de modo a obter o menor erro associado à medição dos deslocamentos do ensaio.

O deslocamento medido irá traduzir a flexão ou tração de um determinado material, quando sujeito a uma força externa aplicada sobre a superfície (no caso da flexão) ou duas forças nas extremidades (no caso da tração).

Pretende-se ainda a possibilidade de comparar esses mesmos resultados com outro ensaio previamente gravado (através de processamento de imagem ou um outro método) com o objetivo de validar o modelo proposto, assim como o valor dos parâmetros característicos selecionados.

1.3 Organização do trabalho

A dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos principais, sendo que cada um terá subtópicos que permitem desenvolvê-lo com base no objetivo principal definido.

No primeiro capítulo pretende-se dar uma introdução ao tema e matérias alvo de estudo na presente dissertação, efetuar a ponte entre os diferentes ramos de engenharia aqui presentes assim como a organização da estrutura do documento.

No segundo capítulo serão apresentadas várias técnicas e metodologias utilizadas no processamento de imagem, informação disponível para ser extraída de uma imagem assim como alguns exemplos de aplicação de cada método.

No terceiro capítulo serão apresentados alguns algoritmos de procura utilizados no processamento de imagem, em particular aqueles que apresentem maior relevância no estudo do movimento (no caso da presente dissertação dos deslocamentos segundo um plano oxy), assim como as suas vantagens e desvantagens.

No quarto capítulo pretende-se descrever os algoritmos e interfaces desenvolvidas com a apresentação de alguns excertos de código, fluxogramas que permitam uma melhor compreensão da lógica utilizada no desenvolvimento dos algoritmos e dos *output's* definidos.

No quinto capítulo serão apresentados cinco casos de estudo, quatro dos quais reais em que as imagens foram adquiridas em simultâneo com registo de deslocamento proveniente de um sensor tradicional, e um caso teórico para testar as limitações/potencial dos algoritmos em estudo. Também serão apresentadas as visualizações dos gráficos e tabelas de dados previamente definidos na interface desenvolvida.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões do estudo efetuado. São apresentadas referências à possibilidade de desenvolvimentos futuros.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para complementar o estudo efetuado, bem como outras informações complementares colocadas em anexo.

1.4 Notação

As figuras, tabelas e equações são apresentadas com referência ao capítulo em que estão inseridas e são numeradas de forma sequencial no respetivo capítulo.

As referências bibliográficas são numeradas de forma sequencial, sendo a sua identificação apresentada entre parêntesis retos [].

A identificação de expressões, informação complementar e abreviaturas são apresentadas entre parêntesis curvos ().

Expressões em língua estrangeira são apresentadas em formato itálico.

Comandos MATLAB® usados descritos em texto estarão entre aspas (“comando”).

A simbologia utilizada no decorrer do texto segue o apresentado previamente na lista de acrónimos e símbolos.

2

Processamento de imagem digital

Pretende-se neste capítulo apresentar de forma resumida os aspetos fundamentais do processamento de imagem digital, i.e. como é adquirida e armazenada, que informação se pode extrair da mesma, técnicas para transformação/modificação de imagem que permitam a obtenção de informação relativa ao seu conteúdo (objetos).

2.1 Estado de arte

Já o filósofo chinês Confúcio (viveu entre 552 e 479 a.C.) dizia que “uma imagem vale mais que mil palavras”, o que pretendia demonstrar a facilidade e o potencial de explicar algo recorrendo a uma imagem ao invés de palavras. Desde os primórdios da civilização que o homem procura formas de poder representar através de imagens o ambiente ou situações passadas no quotidiano. O que inicialmente era conseguido através de representações manuais sobre a forma de pinturas ou gravuras na rocha, a evolução das tecnologias potenciou o desenvolvimento de sistemas de aquisição de imagens que nos permitem obter representações do que vemos assim como de espectros que não estão ao alcance do olho humano.

O salto na evolução da aquisição de imagem teve a sua maior amplitude com o aparecimento da imagem digital. Aliado a este fator, a evolução dos computadores e da sua capacidade de processamento, constitui o elemento chave no processamento digital de imagem.

Transpondo a sabedoria de Confúcio para o conceito de processamento de imagem, uma imagem digital pode conter milhares ou milhões de palavras (pixeis), informação essa que pode não ser visível ao olho humano, ou seja, na prática iremos ter uma estrutura composta por milhares ou milhões de pixéis (dependendo do tamanho e resolução da imagem), cada um contendo informação de cor, intensidade e brilho. A análise dessa informação poderá ter um elevado potencial de aplicação nas mais variadíssimas áreas de engenharia.

O processamento digital de imagem é um campo em constante mudança, tendo sofrido uma grande evolução a partir dos meados da década de 80. O que nos primórdios desta tecnologia exigia a utilização de equipamentos (*hardware*) dedicados e volumosos, a evolução ocorrida nos sistemas de aquisição de imagem (câmaras) e processamento de dados (computadores) está a permitir mudanças nessa tendência, sendo cada vez mais comum as placas de aquisição compatíveis com os barramentos dos computadores e o *software* dedicado para o processamento, estando esta tecnologia atualmente bastante acessível do ponto de vista económico. Existe no entanto áreas onde a qualidade de imagem e o alcance das lentes exigem *hardware* volumoso e dedicado, do qual se pode destacar as imagens de satélite [8][9].

Historicamente, o desenvolvimento do processamento digital de imagem teve origem na área da engenharia eletrotécnica, como complemento aos sensores e detetores físicos existentes, e paralelamente nas áreas das engenharias informática e computadores, no desenvolvimento de aplicações de visão computacional. Em algumas universidades estes dois campos de aplicação continuam a ser abordados separadamente, mas são muitos os pontos comuns a ambos e as aplicações que obrigam muitas vezes a uma análise conjunta [8].

A importância do processamento de imagem deriva do nosso sentido primário ser a visão, que nos permite interagir com o meio que nos rodeia de forma quase imediata, precisa e segura, sem ser necessário recorrer a qualquer tipo de contacto físico com o mesmo, tratando-se do sistema neural mais avançado do corpo humano. Este facto revela não só a sua importância assim como a sua fraqueza, i.e. elevada complexidade da análise da informação e necessidade de elevados recursos de processamento. Existe no entanto uma particularidade muito importante, que podendo não ser relevante para o estudo do movimento, haverá outras áreas da ciência cujo potencial será elevado, i.e. ser capaz de lidar com quase todo o espectro eletromagnético estando somente dependentes do tipo de *hardware* (câmara fotográfica) usado na aquisição da imagem, ao invés do olho humano que possui um espectro limitado ficando restringido às ondas visíveis[8].

Antes de se abordar a temática do processamento de uma imagem digital, é importante definir de forma simplificada o que é uma imagem. Uma imagem pode ser definida como representação num plano de um determinado objeto ou cenário físico, i.e. uma *matriz* de duas dimensões (plano) em que o valor $f(x,y)$ representa a intensidade (I) do nível de cor (sistema monocromático) no ponto de coordenada (x,y) . Se os valores x e y forem finitos teremos uma representação discreta desse mesmo cenário. A essa representação dá-se o nome de imagem digital[9].

A um ponto de coordenada $f(x,y)$ dá-se o nome de *pixel*.

Uma imagem digital pode ser representada em tons de cinza, a cores (de diversos formatos) ou de forma binária (0 ou 1 lógico).

- **Imagem em tons de cinza**

Imagem em que a intensidade de cada *pixel* terá uma determinada amplitude de acordo com a sua resolução de intensidade.

É bastante comum em processamento de imagem a conversão para tons de cinzento de uma imagem a cores, por apresentar boa performance e por conter até menos 2/3 de dados para processamento.

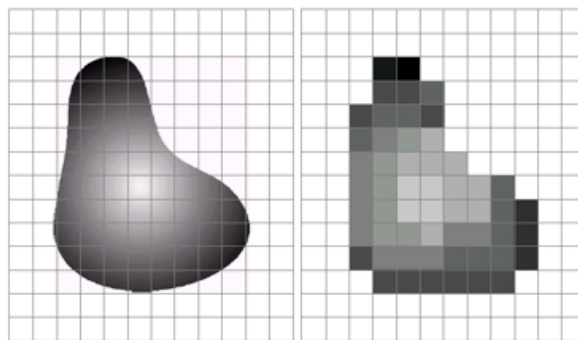


Figura 2.1 – Representação no plano de uma imagem (ou tonalidades) e sua correspondente discretização (adaptado de[6]).



Figura 2.2 – Representação da escala de cinzas para uma imagem (adaptado de[9]).

- **Imagem a cores**

Uma imagem digital a cores (tomando como exemplo o sistema de cor RGB) pode ser decomposta em três matrizes da mesma dimensão, cada uma contendo a informação relativa à intensidade do brilho do *pixel* relativa a cada cor específica. A imagem será a resultante da sobreposição dos três planos monocromáticos (no caso do RGB-vermelho, verde e azul)[8].



Figura 2.3 – Representação de uma imagem a cores (adaptado de[8]).

- **Imagem binária**

Uma imagem binária, ou também designada por imagem a preto e branco, caracteriza-se por cada *pixel* possuir somente um dos níveis lógicos binário, zero ou um, correspondendo à cor preta e branca respetivamente. Este tipo de imagens são bastante usadas em processamento de imagem, sendo que normalmente se recorre a uma técnica chamada de limiarização (*Thresholding*) para converter imagens em escalas de cinza ou a cores para imagens binárias.

O processamento digital de imagem poderá ser definido como a aquisição e análise da informação visual contida em uma imagem por um computador[8].

No entanto a transposição de um sistema físico para a linguagem máquina de um computador, exige uma cadeia básica de aquisição que permita converter um determinado cenário físico real em linguagem máquina passível de ser processada por uma unidade de computação.

Uma configuração genérica de uma cadeia de aquisição e processamento de imagem pode ser apresentada através dos blocos que se apresentam na figura seguinte, sendo que muitas outras poderão existir.

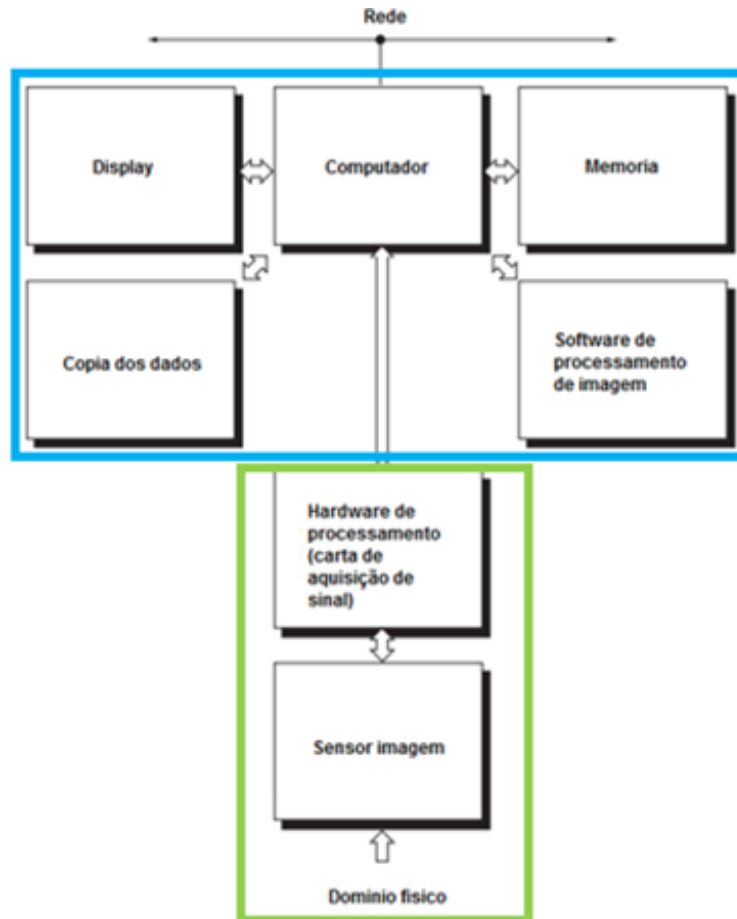


Figura 2.4 – Cadeia genérica de aquisição e processamento de imagem digital (adaptado de[9]).

Observando os blocos apresentados consegue-se facilmente identificar dois blocos principais, assinalados pela cor verde e azul, que representam genericamente os dois dispositivos (*hardware*) que constituem a cadeia, a unidade de aquisição e o tratamento digital (computador) respetivamente, sendo que conforme referido anteriormente poderão existir aplicações particulares que requeiram equipamento específico para cada bloco (ou conjuntos de blocos) apresentados.

Os vários passos relativos à análise e processamento de imagem podem ser os representados na seguinte imagem, na qual se pode identificar um bloco relativo à cadeia de aquisição anteriormente representada[9]:

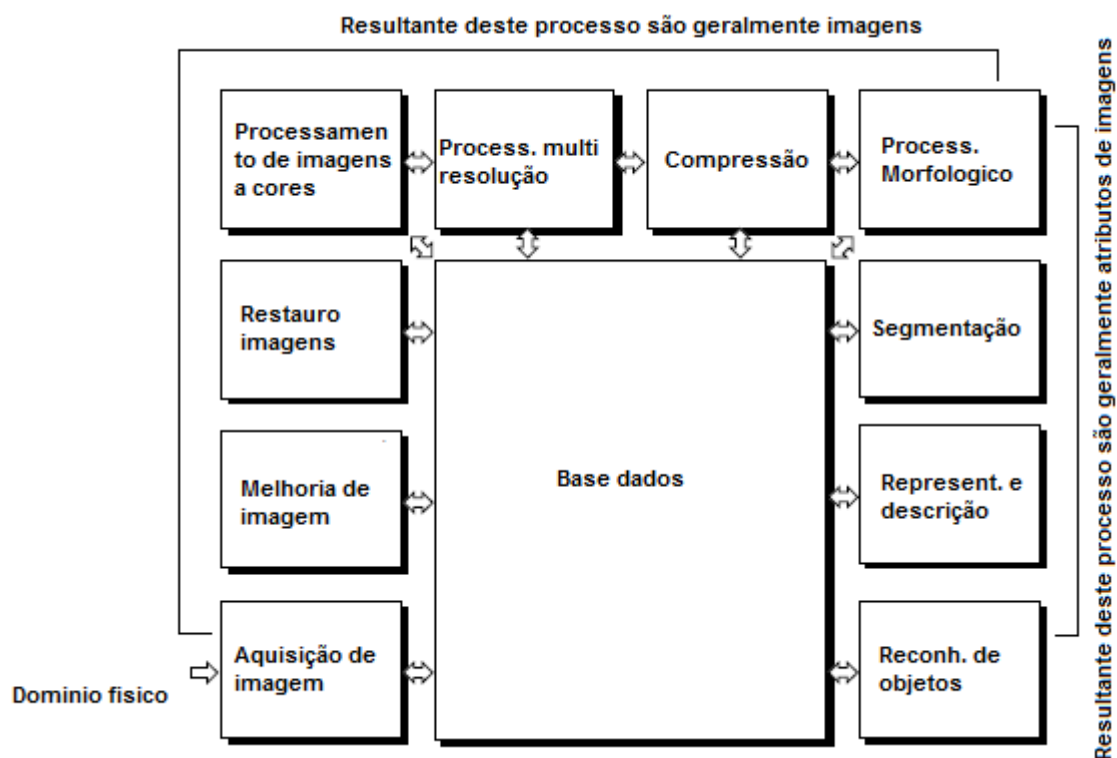


Figura 2.5 – Alguns dos passos fundamentais em processamento de imagem digital (adaptado de[9]).

2.2 Conceitos básicos de aquisição de imagem

Um imagem digital é formada por uma interação energética entre o meio e um dispositivo eletrônico que deteta e mede esse nível de interação. Essas medições são adquiridas em vários pontos segundo uma grelha bidimensional relativamente ao meio de forma a criar uma imagem. Aos equipamentos de medida ponto a ponto dá-se o nome de sensores. Os sensores poderão ser de vários tipos, podendo detetar qualquer frequência do espectro eletromagnético, onda sonora, laser ou um outro qualquer sinal passível de ser medido. Uma vez adquirida e gravada de forma digital em um computador, esta poderá ser analisada de forma a extrair um sem número de características relevantes ao estudo caso a caso[8].

A base de incidência do estudo efetuado na presente dissertação reflete-se numa gama bem definida do espectro, a luz visível, existindo outras gamas de frequência do espectro eletromagnético (EM) com grande aplicação e difusão nas mais variadíssimas áreas tais como os Infravermelho, Ultravioleta, Raios X, micro ondas, ondas rádio e ondas gama, tendo o processamento imagem digital

um papel determinante na análise das características relevantes a cada aplicação, espectro esse representado na figura 2.6.

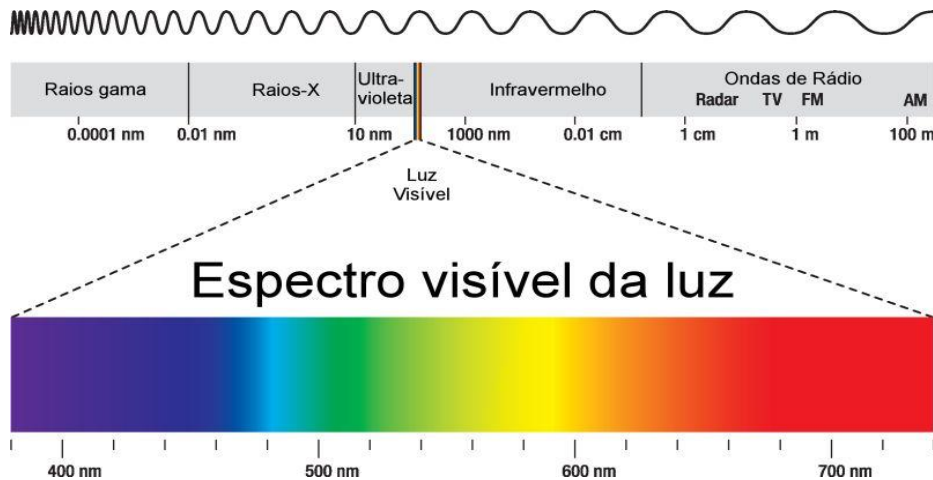


Figura 2.6 – Espectro eletromagnético (adaptado de [43]).

2.2.1 Princípio da formação de uma imagem

O princípio de formação de uma imagem está estreitamente relacionado com o princípio de funcionamento da visão humana. Assim como algumas ondas sonoras podem ser captadas pela audição, e o calor das superfícies detetado pelo tato, é a visão que nos permite interagir com a luz visível e a energia contida nas suas ondas eletromagnéticas. Este conceito pode ser analisado graficamente de forma resumida recorrendo à figura 2.7.

Para se distinguir contornos e cores é necessário que a luz, proveniente de uma fonte externa, seja refletida no objeto e captada pelo olho humano. Deste modo as cores e contornos dos objetos percebidos dependem da frequência e amplitude da fonte de energia, assim como do próprio posicionamento do observador relativamente ao objeto. Torna-se simples perceber que pessoas diferentes (ou os próprios dispositivos de aquisição de imagem) podem ter percepções diferentes para o mesmo objeto de análise.

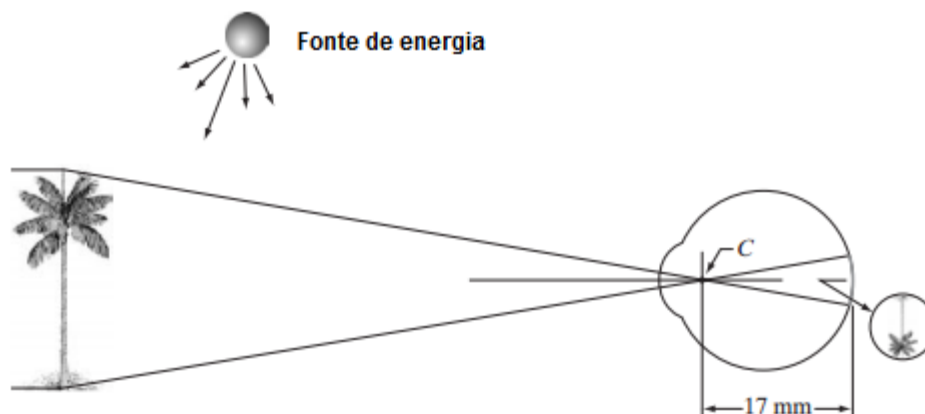


Figura 2.7 – Percepção visual humana de um objeto (adaptado de [9]).

Os milhões de terminações nervosas sensoriais (recetores de luz) existentes na retina transformam a energia da luz refletida em sinais elétricos que são transportados pelo sistema nervoso até ao cérebro, órgão esse responsável por descodificar e processar a informação, criando uma imagem do objeto ou cenário que está a ser observado[9].

Apesar do olho humano estar fixo nas orbitas, a distância entre a lente (c) e o plano sensorial (retina) poderá variar entre 14 e os 17 mm através da alteração da geometria da lente. Na prática é como se nos desloca-se-mos para a frente ou para trás com o objetivo de focar um determinado objeto no espaço. Se nos aproximarmos muito do objeto, o campo de variação do foco pode ser excedido e será impossível visualizar a totalidade do objeto, contrariamente se nos afastarmos muito do objeto, a limitação fisiológica do olho não permite focar com exatidão o objeto, sendo que no limite para uma distância elevada, na perspetiva humana o objeto poderá estar a ser observado como um ponto sem qualquer informação da forma, textura ou cor.

O fenómeno que ocorre no olho humano está na origem do princípio de funcionamento de uma câmara, sendo que com algumas particularidades, a lente neste caso é sólida, sendo a variação da distância do foco consoante se varia a posição da lente. Também será possível detetar radiações fora do alcance do olho humano, desde que para isso se selecione o dispositivo de aquisição respetivo (câmara), dispositivo esse que em alguns casos poderá ter incorporado a fonte de emissão de energia. São exemplos desses casos o raio X, radar, ultrassom, etc.

2.2.2 Aquisição de uma imagem e respetiva conversão analógica/digital

À semelhança do que ocorre no olho humano, em que existem milhões de sensores na retina que permitem transformar as ondas eletromagnéticas proveniente da reflexão da luz num determinado objeto em sinais elétricos que permitirão ao cérebro elaborar uma imagem daquilo que será a percepção física do mesmo, também numa câmara tal fenómeno ocorre. Uma câmara digital capta através da lente um sinal energético analógico relativo à reflexão da luz no objeto ou cenário observado. Internamente possui vários sensores dispostos em linha ou matrizes (n linhas * m colunas) sensíveis à luz proveniente da reflexão de uma determinada radiação eletromagnética originada no objeto, figura 2.8.

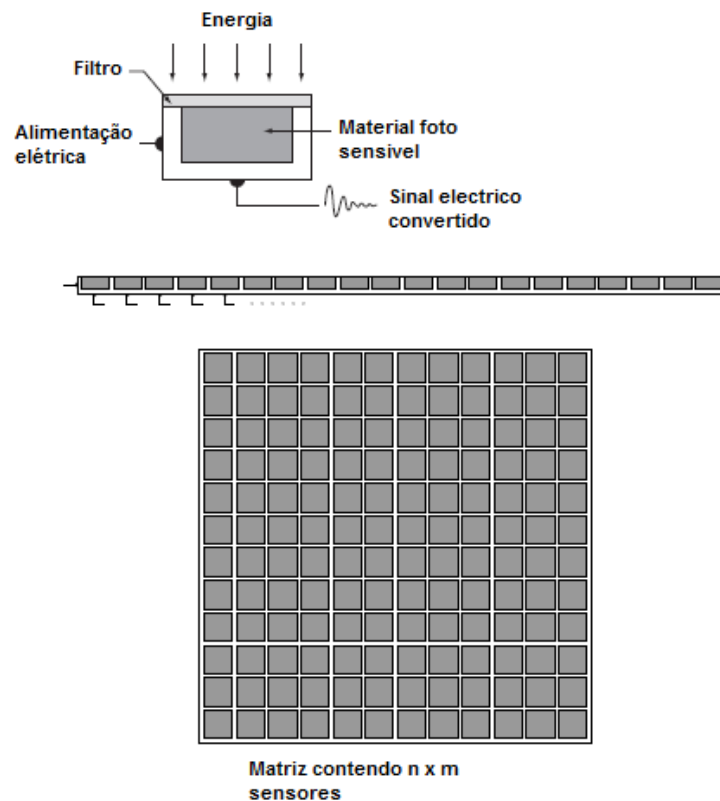


Figura 2.8 – Matriz de sensores para aquisição de imagem numa lente de camara (adaptado de [8]).

No entanto o sensor só por si é um dispositivo analógico, pelo que os sinais gerados são analógicos e contínuos. Um sinal contínuo para ser processado em computador terá que ser transformado num sinal discreto e convertido de analógico para digital (código binário).

Um conversor analógico digital (ADC) é um dispositivo que converte o sinal de amplitude variável e contínuo no tempo, compreendido numa gama especificada de tensão, num sinal discreto em amplitude e tempo com base numa determinada lei de quantização que representa todos os valores

análogos de entrada num número limitado de códigos digitais na saída, sendo que cada um dos quais representa uma fração da saída. A imagem seguinte representa de forma simplificada uma cadeia de conversão analógica para digital (A/D)[10].

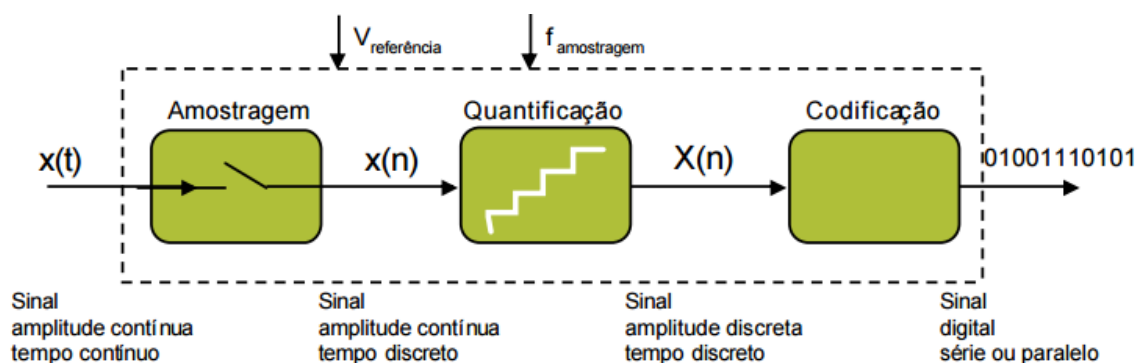


Figura 2.9 – Cadeia básica de conversão A/D (adaptado de[10]).

No entanto a aquisição de um sinal analógico e respetiva conversão requer tipicamente uma cadeia mínima de aquisição e conversão, i.e., fonte de energia e respetivo transdutor para permitir conversão da grandeza física em sinal elétrico, o amplificador de sinal, um sistema de filtragem para eliminar ruído, o amostrador com retenção (sample and hold) e o conversor A/D com respetivos registos (para cada nível discreto de tensão corresponde a um registo binário).

A cadeia de aquisição e conversão do sinal pode ser esquematicamente representada pelo seguinte diagrama de blocos.

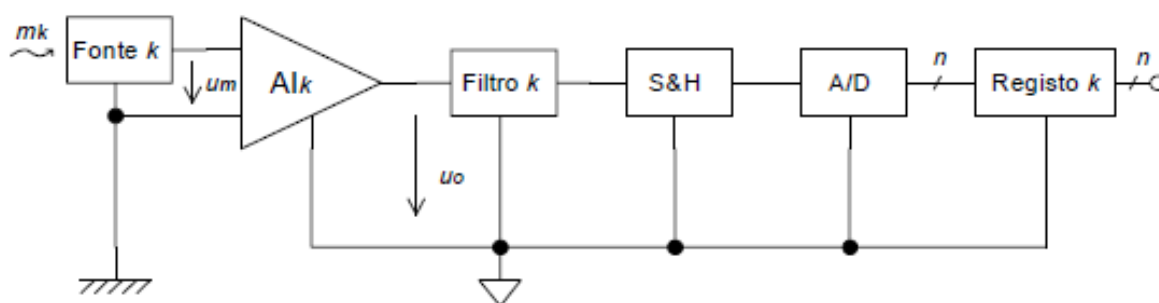


Figura 2.10 – Cadeia básica de aquisição de sinal (adaptado de[44]).

No caso das câmaras digitais, estas já estão equipadas com conversores, sendo que nas analógicas será necessário associar um dispositivo *frame grabber* (digitalizador imagem) para que seja possível efetuar a interface entre o periférico e o computador[8].

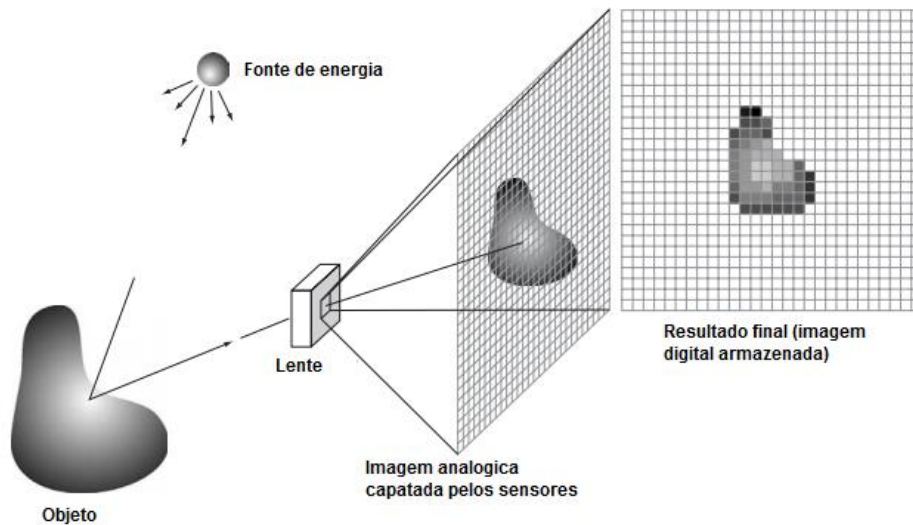


Figura 2.11 – Aquisição e conversão da imagem para digital (adaptado de [9]).

Os níveis de tensão discretos criados estarão ligados diretamente à resolução de intensidade (numero de bits de que que podem caracterizar o brilho de um *pixel*), no entanto para caracterizar a imagem será necessário também ter em conta a resolução espacial (numero de pixéis por imagem)[9].

A escolha de um equipamento com elevada resolução espacial e intensidade garante uma melhor qualidade e precisão da imagem a gerar em computador, garantindo uma conversão digital mais próxima da realidade física, ou seja com menor perda de informação.

2.2.2.1 Resolução de intensidade de brilho

A resolução de intensidade define o número de níveis de cinza disponíveis para definir a intensidade do brilho de um determinado *pixel*.

Um imagem quando convertida para digital obriga a uma descretização da intensidade do brilho de cada *pixel*, através de uma conversão A/D. A essa conversão estará associada uma resolução em tensão, que é o menor valor de grandeza que o conversor deteta. Quanto menor for o valor de tensão maior resolução em intensidade teremos na imagem adquirida, podendo esta ser expressa em bits ou bytes. Vejamos a imagem seguinte em que a conversão baseia-se numa resolução a 8 bits (8 níveis de cinza) para traduzir o objeto físico.

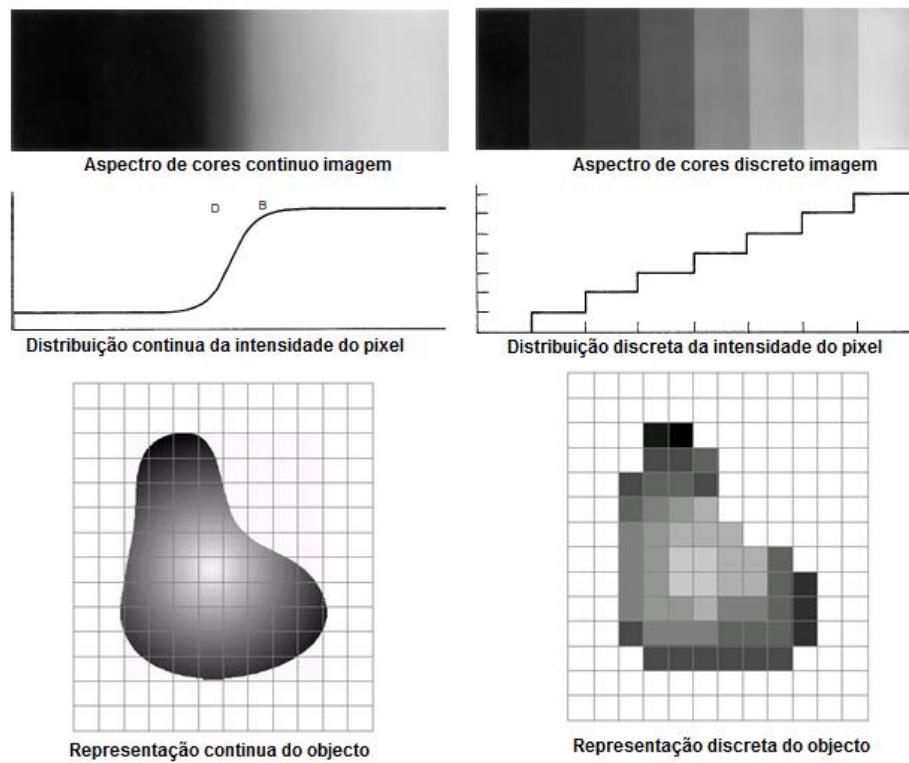


Figura 2.12 – Exemplo de discretização da intensidade de uma imagem a 8 cores (adaptado de [45][6]).

Pode-se observar na figura 2.13 uma diminuição dos pormenores de uma imagem com mais resolução de intensidade para uma de menor valor. Uma resolução de intensidade elevada pode ser determinante em imagens que apresentem grandes pormenores (texturas, cores, etc).

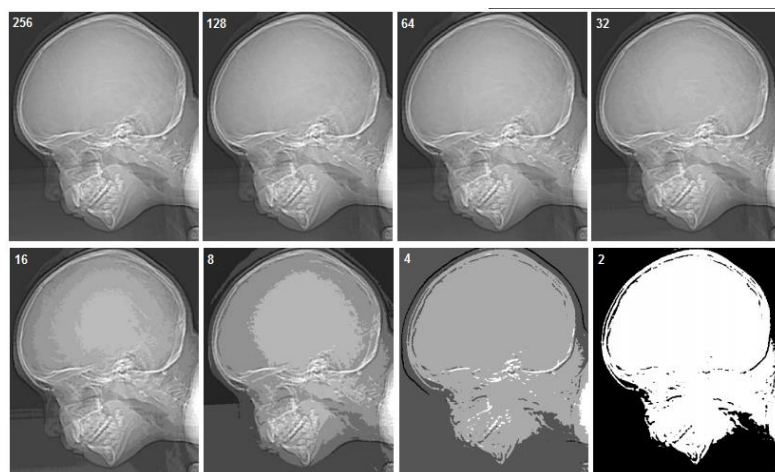


Figura 2.13 – Efeito na qualidade da imagem com a redução da resolução de intensidade (de 256 até 2 cores) (adaptado de [9]).

Tipicamente a resolução em intensidade pode ser manipulada em *software* por forma a obter uma redução da mesma. Esta técnica pode ter interesse uma vez que reduz a necessidade de computação aumentando a velocidade de processamento. Dependendo da aplicação, poderá ou não ser uma técnica a ter em consideração.

Existe uma técnica muito usada em processamento que funciona como uma redução de resolução de intensidade, a limiarização ou *thesholding* (1 bit resolução) técnica essa descrita mais a frente nesta dissertação.

2.2.2.2 Resolução espacial

A resolução espacial define o número de *pixel* por unidade de comprimento. Esta característica depende diretamente do tamanho e proximidade de cada sensor ótico integrados em uma câmara.

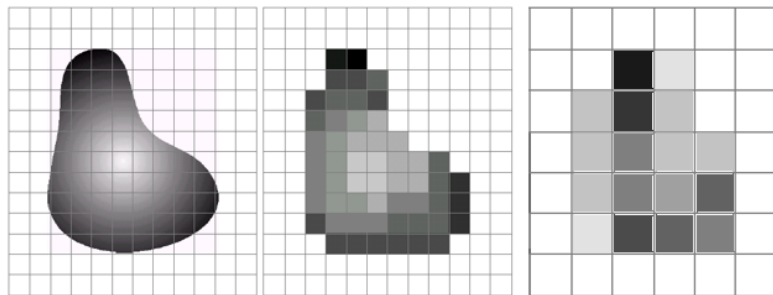


Figura 2.14 – Efeito na qualidade da imagem com a redução da resolução espacial. Da esquerda para a direita, projeção do objeto físico, imagem digitalizada segundo resolução espacial x e finalmente uma digitalização da imagem do objeto segundo uma resolução $x/2$ (adaptado de[6]).

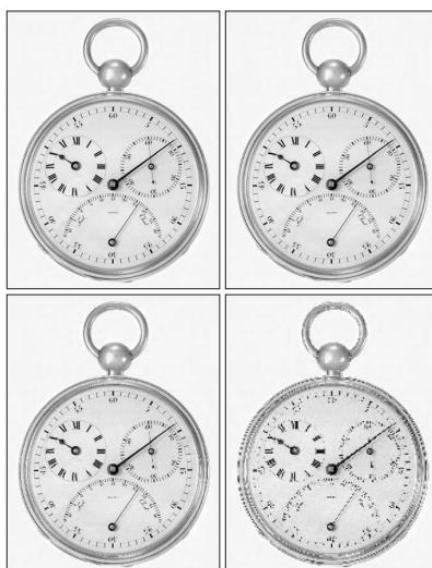


Figura 2.15 – Efeito na qualidade da imagem com a redução da resolução espacial (adaptado de [9]).

Nestes casos, uma imagem gerada com uma baixa resolução espacial poderá ter um aspecto suavizado, sem variações bruscas.

2.2.3 Armazenamento de uma imagem digital

Uma imagem digital não poderá ser adquirida, armazenada e difundida sem que sejam tidas em consideração um conjunto de regras que permitam a sua compatibilidade com os diversos equipamentos/*software* em geral. Para tal existem um número variado de formatos de compressão normalizados ou padronizados, adotados tanto pelos fabricantes de equipamentos de aquisição como os de *software*. Cada formato de imagem (formato de compressão) terá as suas particularidades que normalmente afetam a qualidade da imagem[11].

Os pressupostos anteriores também se aplicam ao vídeo digital que muito sumariamente será um conjunto de fotografias apresentadas sequencialmente e intervaladas de um determinado período (cuja frequência de amostragem será tal que a percepção do olho humano não detete discontinuidades) dando a sensação de movimento contínuo de um determinado objeto, podendo ainda conter informação relativa a áudio.

No processamento de imagem e/ou vídeo não se pode dizer que há um formato ideal, no entanto é boa prática utilizar um formato de elevada qualidade (resolução espacial e de intensidade elevada),

traduzindo-se de forma mais precisa o meio físico contido na imagem e garantindo uma melhor análise do evento/problema apresentado.

2.2.3.1 Formatos de compressão de uma imagem digital

São apresentados como exemplos, cinco formatos de armazenamento de uma imagem digital. Existem no entanto um número muito grande de outros métodos, cada um com a sua particularidade.

- JPG – Suporta um número elevado de cores (24 bits), estando vocacionado para fotografias de qualidade[11].
- GIF – Formato de imagem utilizado tipicamente em páginas da internet devido à sua dimensão reduzida e à capacidade de permitir a utilização não só em imagens como animações, apresentando no entanto uma baixa qualidade de imagem, suportando somente 8 bits de cor[11].
- PNG – Trata-se de um formato semelhante ao GIF, sendo que neste caso permite melhor qualidade de imagem por bit. Contrariamente não suporta animações e não é reconhecido por todos os *browsers*[11].
- BMP – Formato em que as imagens são gravadas como um mapa de bits. Permite elevada qualidade (ao nível do *true color* (24bits)). Não permite um grande nível de compressão o que o torna muito pesado[11].
- TIFF – É tipicamente usado na indústria da impressão o que demonstra a sua qualidade (ao nível do *true color*). Um ficheiro TIFF permite múltiplas imagens e pode conter informações adicionais relativas à imagem (pode conter várias imagens, pode ser comprimido sem perder qualidade, pode conter etiquetas com características da imagem, etc...). Boa capacidade de compressão [11].

A qualidade de imagem dependerá não só do formato em que é gravada, assim como do equipamento de aquisição.

2.2.3.2 Formatos de compressão de vídeo digital

Também no caso dos vídeos, existe um número elevado de formatos de compressão padronizado. Estes podem conter não só vídeo mas som. Serão apresentados quatro desses formatos com algumas das suas características particulares.

- MPEG – Permite uma elevada compressão o que reduz de forma drástica a dimensão dos ficheiros. O conceito base associado a este formato é que em vez de se guardar todas imagens digitais, somente são guardadas as diferenças entre elas, sendo periodicamente inseridos dados que permitem uma reconstrução do vídeo. Toda a informação desnecessária à reconstrução do vídeo é descartada. Trata-se de um formato muito usado na difusão de filmes na internet, na televisão digital por cabo assim como na difusão de filmes por DVD[11].
- AVI – trata-se de um formato adotado pela Microsoft para ficheiros multimédia em ambiente do Windows®. Pode conter vídeo e áudio. No entanto trata-se de um formato com baixa resolução (baixa qualidade de imagem)[11].
- WMV – Trata-se de um formato usado pela Microsoft para ambiente Windows®. Suporta também vídeo e áudio em simultâneo[11].
- MOV – Formato desenvolvido inicialmente para computadores da Apple[11].

2.3 Aplicações associadas ao processamento de imagem

O recurso ao processamento de imagem é praticamente transversal a todas as áreas científicas, para implementação em diversas aplicações ou resolução dos mais variadíssimos problemas. Estes poderão ser organizadas em dois grandes grupos com base no recetor da informação processada, i.e. em visão computacional e visão humana, sendo que a análise da informação contida na imagem será transversal a ambas, figura 2.16.

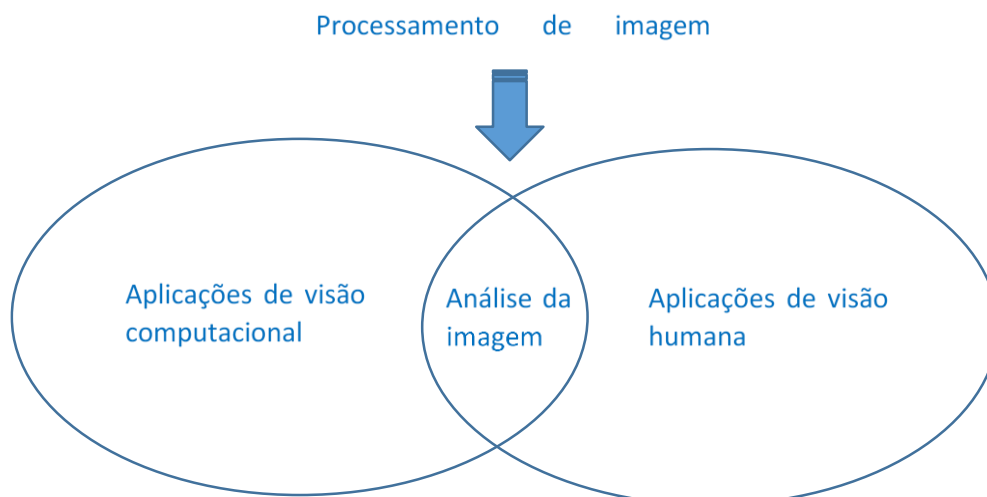


Figura 2.16 – Processamento de imagem digital (adaptado de[8]).

2.3.1 Aplicações de visão computacional

Em aplicações de visão computacional, a informação adquirida através de *hardware* será convertida em linguagem máquina e analisada, sendo interpretada diretamente pelo computador, não havendo um interação com a visão humana[8].

A medição de um deslocamento será exemplo deste tipo de aplicação. A informação recolhida de uma sequência de imagens são processadas num computador devolvendo o resultado numérico dessa grandeza.

2.3.2 Aplicações de visão humana

Em visão humana, a informação convertida em linguagem máquina e processada conforme a aplicação desejada será novamente convertida de forma a ser apresentada na interface gráfico com a visão humana, requerendo que este esteja definido para criar um *output* de acordo com o comprimento de onda visível ao olho humano[8].

Também neste caso muitas serão as aplicações existentes, destacando-se por exemplo a melhoria da qualidade de imagem/vídeo (eliminar ruído ou imperfeições) e a compressão de imagem/vídeo[8].

2.3.3 Análise e processamentos da imagem digital

A análise da imagem é transversal aos dois grandes grupos do processamento de imagem. Qualquer ação realizada sobre uma imagem previamente guardada, será objeto de processamento de imagem, seja para aplicar algum filtro pré-definido, seja para realizar alguma operação mais complexa como procura de um determinado bloco/objeto, contorno ou outras características de uma determinada imagem.

Em processamento de imagem existe um conjunto de métodos e técnicas básicas que servirão de base para algoritmos mais avançados. No entanto conforme referido nos pontos anteriores, uma imagem digital será armazenada como um matriz de dimensão (n)linhas*(m)colunas que contem a informação da intensidade do brilho por cada posição (*pixel*). A partir do momento em que possamos ter um *software* que permita ler a imagem e carregá-la como uma matriz de dados, e que este possua uma boa capacidade de processamento matemático, esta poderá ser trabalhada matematicamente como uma matriz genérica de dados, permitindo uma infinidade de operações.

Como a base de desenvolvimento da interface desenvolvido na presente dissertação será o software MATLAB®, alguns exemplos de aplicação serão com base nesse mesmo programa, sendo que existem outras aplicações para computadores cujas funcionalidades principais serão semelhantes.

2.3.3.1 Leitura das características base de uma imagem

A leitura da imagem (carregar a imagem num programa de processamento de imagem) permite obter informação sobre o tipo de imagem, se a cores ou monocromático, qual a resolução de intensidade de brilho, qual a resolução espacial, entre outras.

Apresenta-se na figura 2.17 um exemplo da aplicação do comando “imfinfo” à imagem “football.jpg”, no qual podemos observar algumas das características importantes a considerar quando se elabora uma ferramenta para processamento de imagem digital.

```

info =

    Filename: [1x66 char]
    FileModDate: '01-Mar-2001 09:52:38'
    FileSize: 27130
    Format: 'jpg'
    FormatVersion: ''
    Width: 320 (m) colunas
    Height: 256 (n) linhas
    BitDepth: 24 3x 8 bits de cor (0 a 255) correspondendo a RGB
    ColorType: 'truecolor' RGB
    FormatSignature: ''
    NumberOfSamples: 3 3 bit's por pixel ⇔ RGB
    CodingMethod: 'Huffman'
    CodingProcess: 'Sequential'
    Comment: {}
    
```

Figura 2.17 – Exemplo de informação passível de ser recolhida de uma imagem digital.

Podemos tirar da informação recolhida que se trata de uma imagem a cores (RGB) com uma resolução de intensidade de brilho de 24 bits e uma resolução espacial de 256x320 bits, entre outras informações que poderiam ou não ser importantes. Esta informação é de extrema importância, pois existirão comandos/técnicas/métodos que só poderão ser executados em tipos de imagem podendo ser necessário recorrer à conversão da mesma ou estudo de determinadas características as quais iremos referir nos pontos seguintes.

2.3.3.2 Manipulação ponto a ponto de uma imagem

Este tipo de manipulação, como o nome indica é feito ponto a ponto, i.e., modificação da intensidade de cada *pixel* sem existir uma dependência da vizinhança.

Este pode ser aplicado a uma imagem completa, a uma região da imagem ou somente a um *pixel* isolado [12].

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (2.1)$$

Em que “g” é a intensidade do *pixel* após aplicação da transformação “T” ao *pixel* de cordenada (x,y) genérico.

São apresentados de seguida duas aplicações onde se pode aplicar esta técnica, no entanto será o problema a ditar o tipo de manipulação específica a realizar[12].

- **Negativo de uma imagem**

Uma das principais aplicações da transformações do negativo de uma imagem prende-se com a necessidade de realçar determinados níveis de branco, preto ou cinza em uma imagem, muito difundidas nas ciências médicas[13].

Permite corrigir algumas imperfeições assim como melhorar clareza psicovisual. O negativo pode ser obtido a partir da seguinte expressão[12]:

$$g(x, y) = (MAX - f(x, y)) \quad (2.2)$$

Em que “MAX” corresponderá ao valor da intensidade de brilho máxima da imagem e f(x,y) o valor do *pixel*.

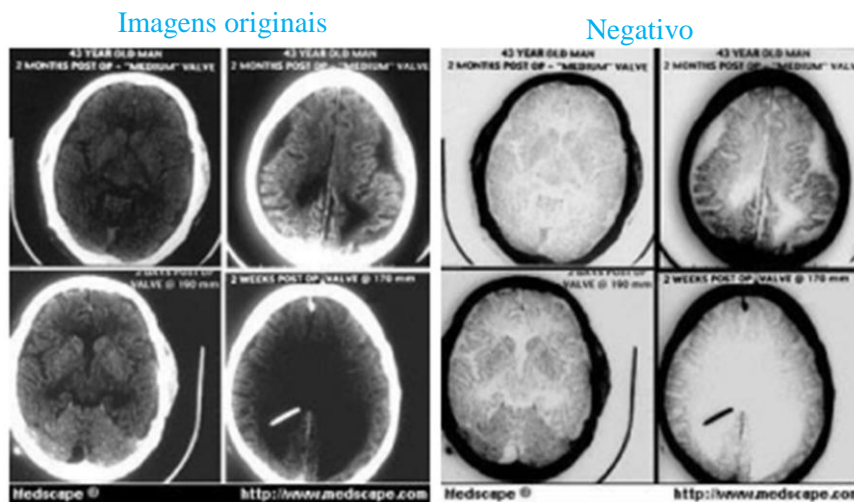


Figura 2.18 – Exemplo de negativo de imagem (adaptado de[13]).

- **Normalização contraste (Contrast Stretching)**

Trata-se de uma técnica simples de melhoria visual de uma imagem através da distribuição do nível de intensidade de brilho ao longo de uma determinada gama de variação da resolução de intensidade. Um exemplo de uma função simples que traduz a normalização poderá ser a que se apresenta de seguida[14]:

$$P_{out} = (P_{in} - c) \frac{b - a}{d - c} + a \quad (2.3)$$

Em que “Pout” e “Pin” são as intensidades do *pixel* da imagem normalizada e da imagem original respetivamente, "a" e "b" o limite mínimo e máximo da resolução de intensidade e “c” e “d” o valor mínimo e máximo da intensidade do *pixel* da imagem original[14].



Figura 2.19 – Exemplo de normalização de contraste (adaptado de[14]).

- **Histograma de uma imagem**

O histograma da intensidade do brilho permite-nos saber como se encontra distribuído o brilho ao longo da resolução de intensidade uma determina imagem. Para uma imagem com resolução de intensidade de brilho de 8 bits, o número de pixéis serão empilhados segundo o seu valor específico na gama compreendida entre 0 e os 255, conforme figura 2.20[15].

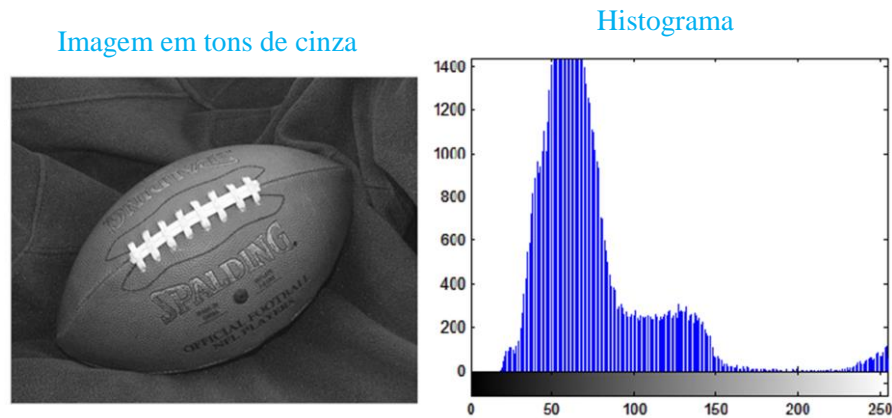


Figura 2.20 – Exemplo de geração de um histograma.

Uma das operações possíveis relativa a uma imagem será a equalização do seu histograma. Trata-se de um processo não linear que enaltece o brilho dessa mesma imagem. Relativamente ao histograma em si, cria uma distribuição mais uniforme dos valores de intensidade do brilho de cada *pixel* ao longo da resolução de intensidade. Esta operação permite visualizar de forma mais precisa os contornos do objeto (a variação tridimensional), figura 2.21[15].

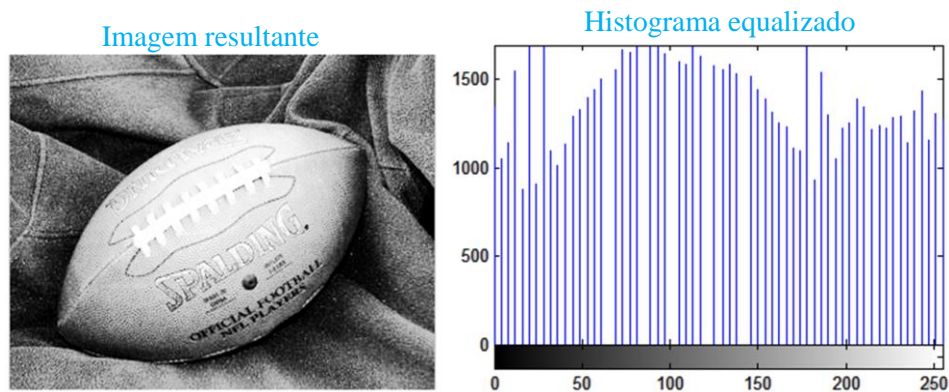


Figura 2.21 – Exemplo de imagem resultante após equalização de um histograma.

A leitura de documentação variada sobre processamento de imagem, refere constantemente o valor de limiar (*threshold*) usado na geração de imagens binárias. Muitos poderão ser os métodos para obter o valor de limiar, no entanto a base desse conceito assenta na análise do histograma como por exemplo o método de Otsu.

2.3.3.3 Conversão de uma imagem

A conversão de imagens é uma técnica muito usada em processamento de imagem. Nos seguintes pontos explicar-se-á os métodos que utilizam esta técnica para a resolução de determinados problemas, onde será igualmente apresentado as suas vantagens.

- **Conversão de imagem a cores para tons de cinzentos**

Uma das conversões bastante utilizada em processamento de imagem é a de uma imagem a cores (RGB) para uma imagem equivalente monocromática em tons de cinzento. A base será transformar uma imagem cuja intensidade de cada *pixel* é caracterizada por uma representação tridimensional (relativo ao RGB) por uma em que exista somente uma dimensão do parâmetro intensidade de brilho. Muitos são os métodos utilizados para obter a respetiva conversão, sendo que podem influenciar a performance da conversão, será importante conhecer a natureza da imagem a converter a fim de se escolher o mais adequado[16].

São apresentadas duas expressões que podem traduzir este tipo de conversão, a primeira (2.4) usando a média aritmética das diversas componentes e a segunda (2.5) utilizando uma média ponderada:

- **Exemplo de método (com base em[16]).**

$$\frac{1}{3}(I_R + I_G + I_B) = I_G \quad (2.4)$$

- **Exemplo de método de cálculo da função “RGB2gray” do MATLAB®.**

$$0,2989 * I_R + 0,5870 * I_G + 0,1140I_B = I_G \quad (2.5)$$

A título de exemplo, uma imagem a cores (RGB) contendo 24 bits de dados por *pixel* (8 bits a multiplicar por 3 tonalidades de cor – vermelho, verde e azul). Em termos de perceção da visão humana, a conversão de uma imagem a cores de 24 bits para tons de cinzentos contem informação de brilho mais que suficiente à compreensão espacial do meio físico envolvente. Em termos de processamento de imagem, cada *pixel* passará a conter 8 bits, contrariamente aos 24 bits de uma imagem RGB, o que tornará o processamento neste caso muito menos exigente, e conseqüentemente mais rápido sem penalizar significativamente o resultado final da análise[8].[17]

É apresentado um exemplo simplificado de conversão na figura 2.22.

Imagem original

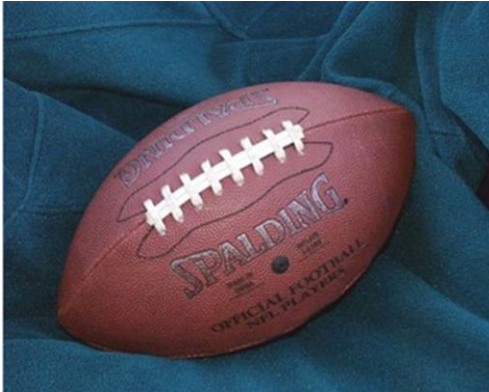


Imagem convertida para tons cinzentos



Figura 2.22 – Exemplo de conversão imagem a cores para tons de cinzentos (média ponderada).

- **Limiarização de uma imagem (*thresholding*)**

Também conhecido como binarização de uma imagem monocromática (cinzas ou um qualquer dos tons de uma imagem a cores RGB), consiste na conversão do valor da intensidade do brilho de cada *pixel* da imagem no valor lógico um ou zero segundo uma determinada intensidade de brilho, valor esse chamado de limiar[8].

Apesar do conceito estar na base da seguinte expressão apresentada, existe um variadíssimo número de algoritmos para aplicação deste método, cada um com a sua particularidade[18].

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(xy) > T \\ 0 & \text{se } f(xy) \leq T \end{cases} \quad (2.6)$$

Apresenta-se dois exemplos de conversão, no primeiro caso a conversão de uma imagem a cores (RGB) diretamente para tons de cinza usando o comando “`rgb2gray`”, e no segundo caso binarizando a imagem obtida em tons de cinza e executando o mesmo comando para um dos tons monocromáticos da imagem a cores (neste caso para o encarnado) com base num limiar de intensidade 50 (valor meramente indicativo), figura 2.23, tendo em conta o histograma desta mesma figura apresentado na figura 2.20.

Com base na imagem convertida em tons de cinza



Com base na tonalidade de encarnado da imagem original (R)



Figura 2.23 – Exemplo da imagem convertida em tons de cinza e da tonalidade monocromática encarnada da imagem original com base num limiar de 50.

A binarização pode ser muito útil, quando corretamente selecionado o nível de limiar, na detecção de objetos, arestas, dimensões de objetos, etc.

2.3.3.4 Filtragem no domínio espacial

Uma imagem pode conter características ou estruturas que pela natureza da análise seja vantajoso isolá-las ou extraí-las do meio envolvente, sendo necessário recorrer a métodos que nos permitam executar essas ações[19].

As técnicas de filtragem são transformações da imagem *pixel a pixel*, que não dependem apenas do nível de brilho de um determinado *pixel*, mas também do valor dos níveis de brilho da respectiva vizinhança. O processo de filtragem é implementado utilizando matrizes denominadas máscaras, as quais são aplicadas sobre a imagem[19].

A aplicação da máscara com centro na posição (x,y) , consiste no cálculo de um novo valor do *pixel* na posição (x,y) que depende dos valores dos *pixels* vizinhos e dos pesos da máscara. Esse valor é armazenado num *buffer*, mantendo a imagem original intacta permitindo a aplicação da máscara a todos os *pixels* com o valor original de intensidade. Uma nova imagem é gerada assim que a máscara tenha sido aplicada a todos os *pixels* da imagem original[19].

Em processamento de imagem, a filtragem está associada ao melhoramento ou condicionamento da imagem

A filtragem espacial é um método utilizado em processamento de imagem que incide sobre o domínio espacial[20]. Os filtros espaciais de duas dimensões mais utilizados correspondem ao de 3 linhas x 3 colunas[9].

Antes de se enumerar alguns exemplos de filtros usados no processamento de imagem, é interessante definir alguns conceitos fundamentais associados a esta temática.

- **Filtragem por processo de correlação e convolução**

O processo de filtragem por correlação consiste em mover um filtro (mascara (n)linhas * (m)colunas) ao longo de uma imagem e processar o somatório dos produtos para cada vizinhança, ver figura 2.24. No caso do processo por convolução, a filosofia é semelhante, o que difere é o facto da mascara ser rodada de 180°[9].

Genericamente a expressão de um filtro espacial será equivalente à expressão da filtragem pelo processo de correlação[9].

$$g(x, y) = \sum_{i=0}^k w_i f(x, y) \quad (2.7)$$

Em que “x” e “y” são tal que o filtro percorra toda a imagem, “k” numero de elementos da máscara, “w” o filtro e “f(x,y)” a imagem original.

A figura seguinte representa de forma simplificada a aplicação de um filtro espacial de convolução.

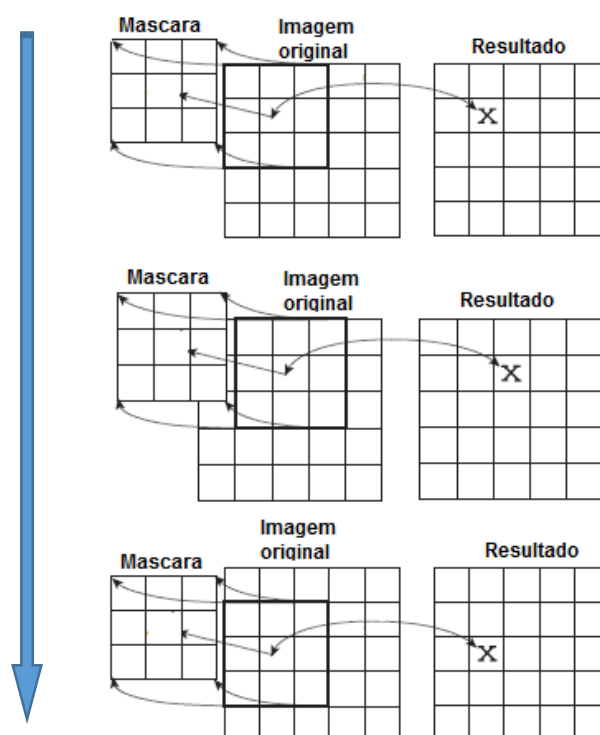


Figura 2.24 – Exemplo de aplicação de filtro a uma imagem (adaptado de[8]).

- **Descontinuidades e patamares nas intensidades de brilho de uma imagem**

Existem métodos de filtragem que apresentam melhor performance quando se efetua um realce prévio dos contornos e patamares de objetos de uma imagem. São exemplo de descontinuidades e patamares os contornos, mudanças de regiões ou objetos ou fronteiras[20].

Um contorno pode ser definido como variações locais da intensidade dos pixéis, podendo estar associada a separação entre duas regiões. As regiões ou objetos são identificados por patamares de tonalidades de cor mais ou menos constante, ver exemplo da figura 2.25[20].

Uma fronteira corresponde normalmente à variação brusca da função de intensidade de imagem, correspondendo a limites de regiões onde a variação da tonalidade de cor é normalmente mais acentuada[20].

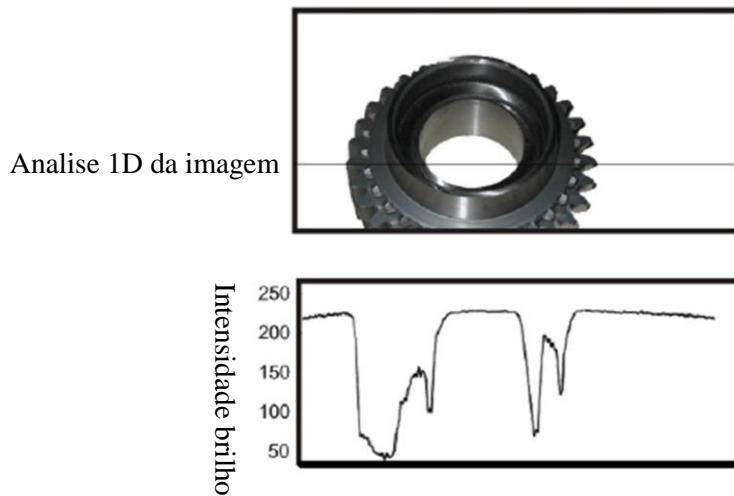


Figura 2.25 – Exemplo da variação da intensidade do brilho ao longo de uma linha de pixels de uma imagem (adaptado de[20]).

2.3.3.4.1 Filtros passa-baixo ou de suavização

Os filtros passa-baixo ou de suavização, como o nome indica têm como objetivo principal atenuar as altas frequências, que no caso da imagem correspondem a transições bruscas nos níveis de brilho de um *pixel* para a sua vizinhança. Permite minimizar o ruído. São exemplo deste tipo de máscaras os filtros da média, mediana, moda, filtro gaussiano, etc[20].

- **Filtro da média.**

São como o nome indica filtros baseados no valor médio. Estes efetuam o calculo da média do valores da intensidade do brilho da vizinhança de um *pixel* e retornam esse valor gravando-o num buffer, precisamente na posição equivalente ao centro da região analisada na imagem original, ver exemplo na figura 2.26. Este filtro tendencialmente dará à imagem resultante um aspeto visual descolorado, manchado ou esbatido. Este tipo de filtragem pode ser usado para remover alguns tipos de ruído devido à pequena degradação da imagem. Um exemplo de máscara de convolução de dimensão 3 x 3 é dada por[8]:

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$



Figura 2.26 – Exemplo de aplicação de filtro da média a imagem em tons de cinzento.

Filtro especialmente robusto na atenuação do ruído do tipo gaussiano[21].

- **Filtro da mediana**

Trata-se de um filtro não linear mas que opera com base na vizinhança de um *pixel* central, à semelhança da média. Este filtro ordena os valores de intensidade dos pixels da região analisada e devolve como output da aplicação da máscara o valor central desse conjunto de valores[8].

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 4 & 12 & 13 \\ 1 & 3 & 255 \end{bmatrix}$$

Ordenando os valores teremos “1-1-2-3-4-5-12-13-255” em que o valor intermedio será 4.

Filtro especialmente robusto na atenuação do ruído impulsivo, descontínuo e de amplitude elevadas, ver exemplo da figura 2.27[20].



Figura 2.27 – Exemplo de aplicação de filtro da mediana a imagem com ruído.

- **Filtro da moda**

À semelhança da mediana, também neste caso o filtro irá ordenar os valores da intensidade dos pixéis de uma determinada vizinhança e definir como resultado o valor que se repete com maior frequência[20]. Tomando como base o seguinte exemplo de uma mascara 3 x 3 contendo os valores de intensidade dos 9 pixéis de uma dada imagem:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 4 & 12 & 13 \\ 1 & 3 & 255 \end{bmatrix}$$

Recorrendo ao exemplo anterior e ordenando os valores teremos “1-1-2-3-4-5-12-13-255” em que o valor que se repete com maior frequência será 1.

Filtro robusto na atenuação do ruído do tipo gaussiano, ver exemplo da figura 2.28[22].



Figura 2.28 – Exemplo de aplicação de filtro da moda a imagem com ruído (adaptado de[22]).

- **Filtro gaussiano.**

Também designado por suavização gaussiana resulta em um atenuar da intensidade do brilho de uma imagem recorrendo à função gaussiana. Tipicamente usada para remover ruído e reduzir detalhes. É usada também em pré-processamento de imagens a analisar por algoritmos computacionais mais avançados por forma a realçar características da imagem, contornos, etc.[21].

A função base do filtro gaussiano a 2 dimensões será definida por[21]:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.9)$$

Filtro especialmente robusto na atenuação do ruído do tipo gaussiano, ver exemplo da figura 2.29[21].

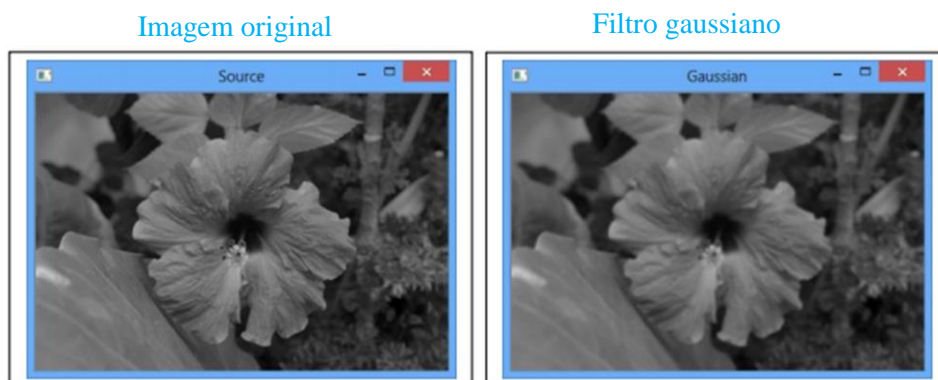


Figura 2.29 – Exemplo de aplicação de filtro gaussiano (adaptado de[21]).

2.3.3.4.2 Filtros passa-alto ou de acentuação

Os filtros passa-alto ou de acentuação, ao invés dos de atenuação, tem como objetivo realçar altas frequências, que no caso da imagem correspondem a transições bruscas nos níveis de brilho de um *pixel* para a sua vizinhança. São usados para realçar detalhes da imagem, com particular incidência na detecção de contornos[20].

A variação espacial do nível de intensidade do brilho do *pixel* da imagem correspondente matematicamente ao gradiente, i.e., às primeiras ou segundas derivadas espaciais dessa mesma variação. De notar que assim que ocorre um escalão relativo à primeira derivada demarca o início da variação da tonalidade e quando retorna a zero representa o fim da variação, sendo a sua amplitude representativa da amplitude da variação (o mesmo se passa para a segunda derivada, sendo que neste caso a variação da tonalidade é detetada através do impulso Dirac positivo e negativo, sendo somente detetados os limites da variação). A imagem seguinte pretende exemplificar o comportamento das derivadas no caso em que se verifique variação de tonalidade de uma imagem[8].

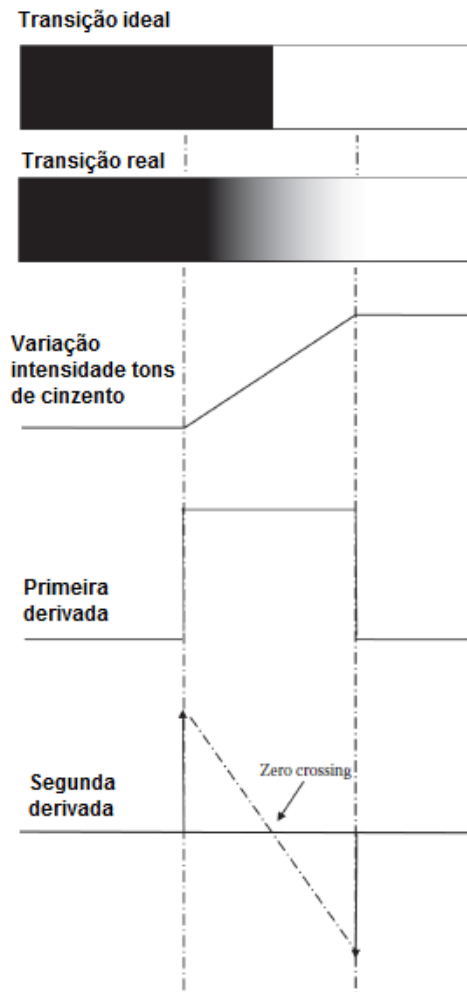


Figura 2.30 – Exemplo da evolução das derivadas espaciais da intensidade de brilho (adaptado de[8]).

Matematicamente o gradiente de uma função de intensidade do *pixel* a duas dimensões poderá ser apresentada de acordo com a expressão seguinte[20]:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df}{dx} \\ \frac{df}{dy} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Da qual se poderá extrair a amplitude da variação e o respetivo ângulo de acordo com o referencial escolhido. Em literatura da especialidade, estes filtros podem estar associados à temática da segmentação de imagens. São exemplo deste tipo filtros o Roberts e Sobel, existindo outros na literatura especializada[8].

- **Filtro Roberts**

É uma máscara que efetua uma aproximação simples à derivada de primeira ordem. Usa máscara de 2x2.

Uma configuração possível para este tipo de máscara será as seguintes máscaras de convolução para as duas dimensões (x,y), sendo apresentado um exemplo na figura 2.31[20]:

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ e } G_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

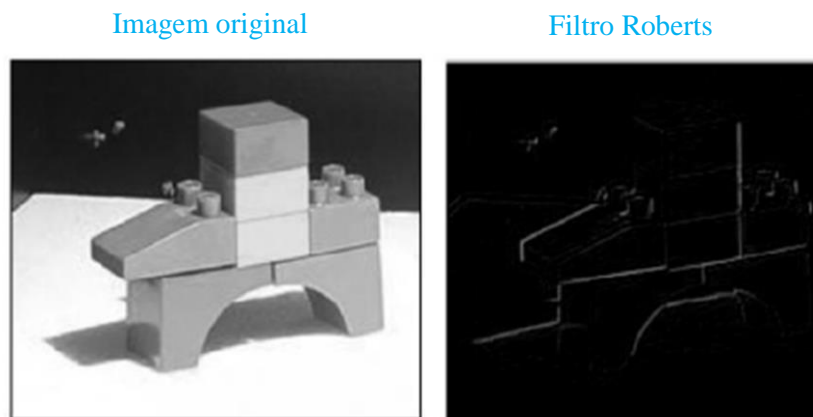


Figura 2.31 – Exemplo de aplicação de filtro Roberts (adaptado de[20]).

- **Filtro Sobel**

O filtro Sobel tem como objetivo obter uma aproximação do gradiente usando uma máscara vertical e uma horizontal, permitindo uma detecção em ambas as direções[8]. A existência destas duas máscaras permite obter a amplitude da variação bem como o respetivo ângulo.

As duas expressões que se seguem pretendem representar as duas máscaras associadas a este método, sendo apresentado um exemplo na figura 2.32[8]:

$$\textit{Vertical:} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\textit{Horizontal:} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

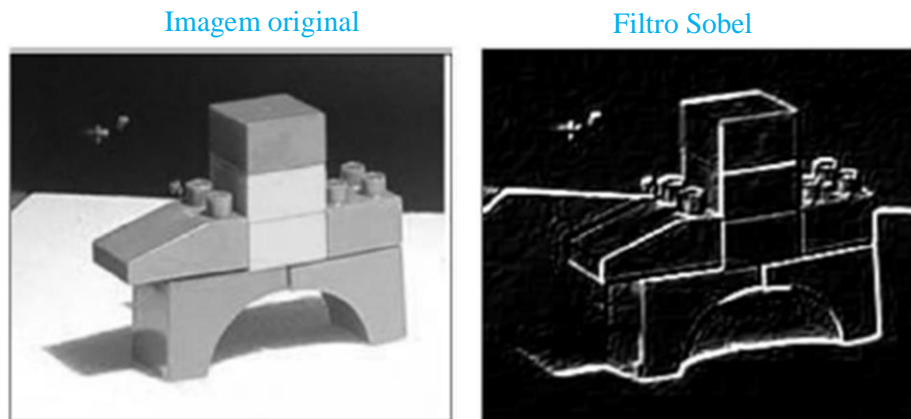


Figura 2.32 – Exemplo de aplicação de filtro Sobel (adaptado de[20]).

2.3.3.5 Segmentação de uma imagem e operadores morfológicos

O processo de segmentação consiste em dividir uma imagem em regiões que possuem o mesmo conteúdo no contexto de uma aplicação. Esta poderá ser baseada em descontinuidades ou similaridades dos diferentes aspetos da imagem[20].

Existe um vasto número de métodos de segmentação de uma imagem, dos quais se podem destacar a filtragem no domínio espacial e de frequência referidos anteriormente[23].

A figura seguinte pretende demonstrar as duas técnicas em que se baseia a segmentação de uma imagem digital.

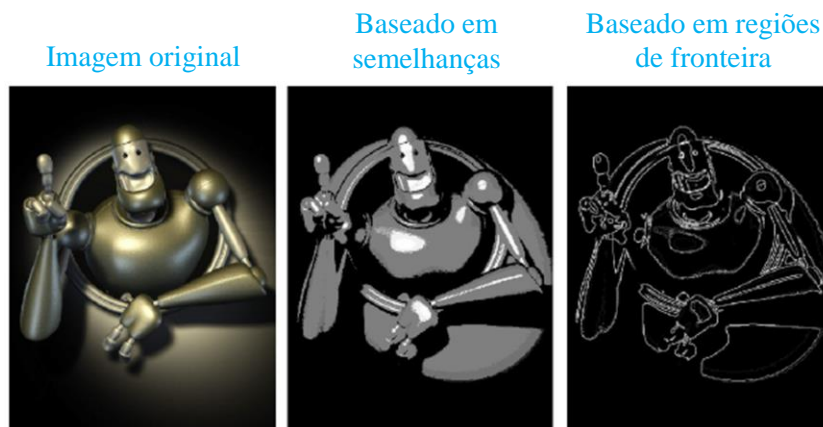


Figura 2.33 – Exemplo de segmentação baseado em semelhanças de tonalidades e em regiões de fronteira (adaptado de[20]).

Em processamento digital, mesmo após a aplicação de técnica ou filtro a uma imagem com vista a obter uma clara segmentação dos diferentes objetos presentes, poderá não ser claro a sua identificação devido a ruído ou a semelhança de tonalidades entre regiões, mesmo quando aplicada

a técnica ideal para a resolução do problema. Torna-se assim necessário aplicar técnicas (ajuste fino) que permitam de alguma forma fazer uma reconstrução e/ou rearranjo do objeto por forma a torná-lo mais aproximado de um objeto morfológico. Essas técnicas dá-se o nome de morfologia matemática.[24].

Tipicamente este tipo de operações garantem uma identificação mais precisa das características dos vários objetos de uma imagem, características essas que podem ser de forma ou espectro visual[24]

- **Morfologia matemática aplicada ao processamento de imagem**

A linguagem da Morfologia Matemática deriva da Teoria dos Conjuntos, onde os conjuntos em morfologia representam objetos em uma imagem. O conjunto de todos os *pixels* pretos em uma imagem binária é uma descrição completa dessa imagem[24].

Os operadores morfológicos fundamentais são a dilatação, erosão, abertura e fecho, existindo algoritmos que combinam vários tipos de operadores garantindo uma melhor performance, figura 2.34[24].

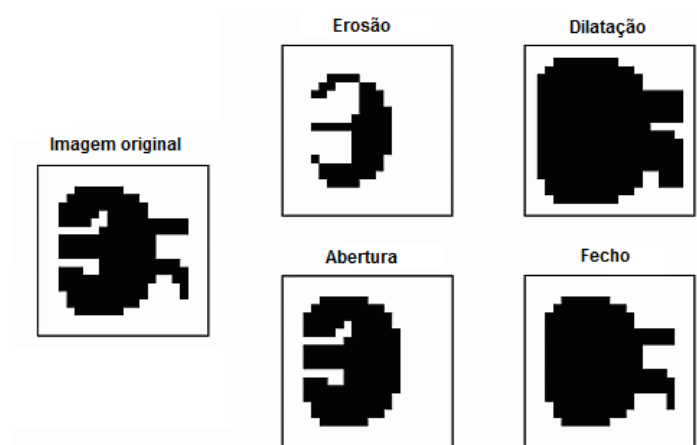


Figura 2.34 – Exemplo de operadores morfológicos básicos (adaptado de[46]).

As figura seguinte mostra alguns exemplos de aplicação de operadores morfológicos individualmente a um conjunto de pixels representando um objeto e a uma aplicação sequencial de operadores para melhorar a qualidade de uma impressão digital.

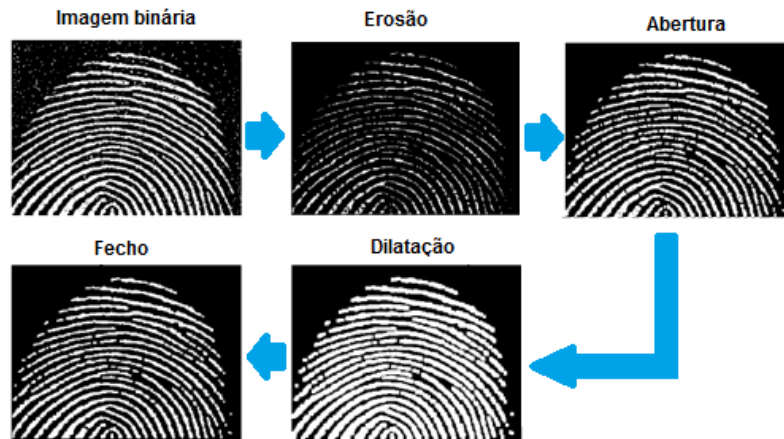


Figura 2.35 – Exemplo de aplicação sequencial de operadores morfológicos básicos para melhoria da percepção de uma impressão digital (adaptado de[9]).

2.3.3.6 Reconhecimento de objetos e respectivas características

O estudo de uma imagem em processamento de imagem digital irá convergir precisamente para este ponto, o reconhecimento de objetos e/ou padrões e suas características relevantes. O seu estudo pode ser dividido em duas áreas principais, os métodos de decisão teóricos e métodos estruturais[9].

Nos métodos de decisão teóricos (método estatístico) os padrões são representados segundo vetores numéricos. Têm como base funções de decisão, que efetuam a organização dos vários objetos segundo classes predefinidas[25][9].

Nos métodos estruturais, o padrão será representado a partir de estruturas simbólicas básicas como é o caso de uma *string*. O reconhecimento de estruturas neste método é efetuado com recurso à comparação da sua representação simbólica com a de vários objetos simbólicos predefinidos [26].

A figura seguinte apresenta de forma agrupada algumas das características de interesse a analisar em processamento de imagem.

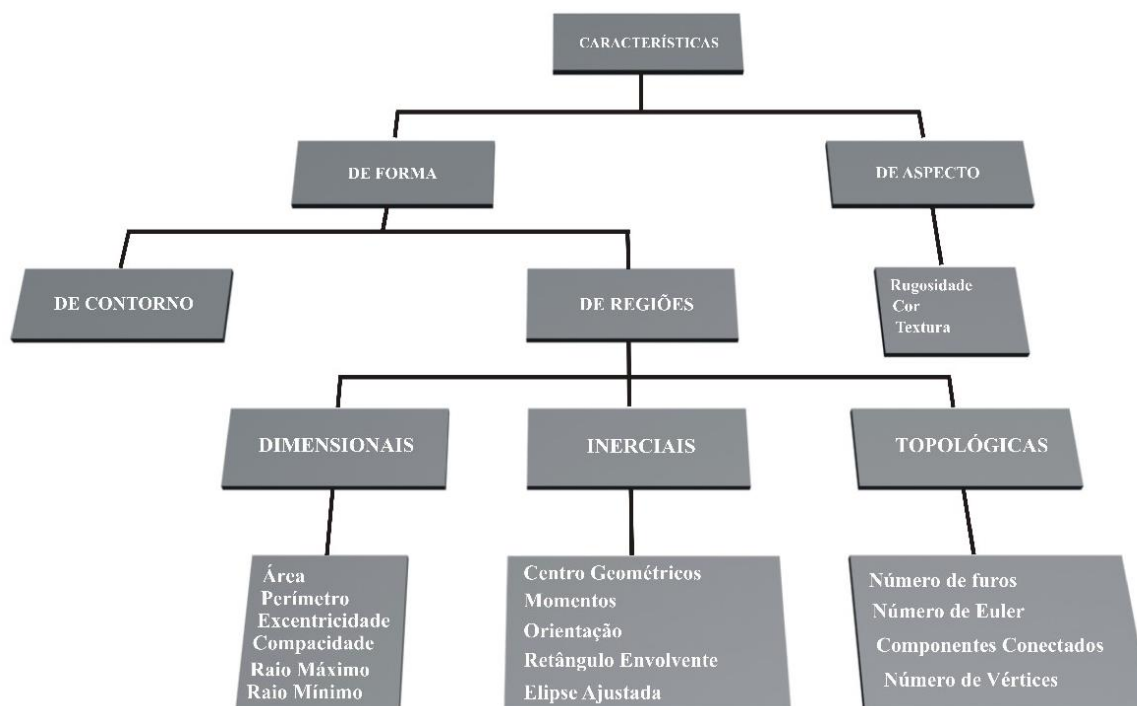


Figura 2.36 – Características básicas a identificar em objetos em uma imagem (adaptado de[20]).

3

Algoritmos de procura utilizados em deteção de movimento

Pretende-se neste capítulo apresentar alguns dos algoritmos disponíveis para a deteção de movimentos de objetos de uma imagem digital, baseados no método de correspondências de blocos (*block matching algorithms*) e métodos diferenciais. Será dada especial ênfase aos algoritmos ARPS e HS, correspondendo estes aos usados na ferramenta desenvolvida.

3.1 Algoritmos de deteção e estimativa de movimento

A dimensão de um vídeo digital é motivo de preocupação quando o espaço de armazenamento é limitado assim como quando se pretende o envio desses mesmos vídeos através de canais de comunicação de largura de banda limitada. Deste modo recorre-se a técnicas de compressão que permitam diminuir a dimensão dos ficheiros e, que garantam nessas condições a qualidade da imagem visual. Para tal recorre-se aos algoritmos de deteção e estimativa de movimento[27].

A estimativa do movimento (do germânico *motion estimation (ME)*) é uma componente chave em métodos de compressão de vídeo de alta definição. Este método explora as redundâncias temporais (correlação estatística entre pixéis de uma sequência de imagens) para prever uma imagem atual baseada na anterior[25][28].

O objetivo principal consiste em extrair informação de um determinado conjunto de *frames* por forma a ser possível detetar o movimento de um *pixel*, estimando deste modo o deslocamento de um dado objeto de uma imagem.

Para que seja possível detetar o movimento de um determinado *pixel* (ou conjunto de pixéis) terá que existir sempre uma imagem de referência t_0 (ou imagem anterior $(t-1)$) e uma imagem atual (t) . A base da determinação do movimento será a procura de um dado *pixel* da imagem atual na imagem de referência de acordo com uma dada função de custo. Para aquele cuja função de custo seja menor será definido como a posição do *pixel* na imagem de referência. O vetor deslocamento entre essa mesma posição e a atual define o deslocamento do *pixel* entre as duas imagens. Em processamento de imagem esse vetor tem o nome de vetor deslocamento ou vetor movimento[28].

Os vários algoritmos existentes de deteção e estimativa de movimento detetam precisamente o deslocamento de um determinado *pixel* (ou conjunto de pixéis dependendo do algoritmo), caracterizando o vetor movimento (do germânico *motion vector – MV*). Apesar dos algoritmos terem sido desenvolvidas particularmente para compressão de vídeo, será possível também o uso dessas técnicas para determinar o deslocamento ocorrido num ensaio em carga através de uma sequência de imagens[28][29].

Os algoritmos podem ser agrupados em dois conjuntos principais, de acordo com a sua base de previsão, i.e., baseado na previsão de movimento de cada *pixel* (método diferencial) ou baseado na previsão do deslocamento de macro estruturas de pixéis (denominados de blocos).

3.1.1 Algoritmos baseados em métodos de correspondência de blocos

No caso do método baseado na estimativa de movimento do bloco de pixéis, a ideia principal consiste em dividir a imagem atual em blocos de $N*N$ pixéis que serão comparadas com blocos de igual dimensão na imagem de referência. O vetor entre o centro do bloco da imagem de referência e o centro do macro bloco analisado da imagem atual determina o vetor deslocamento desse mesmo bloco [30][28].

A eficácia desta técnica depende da iluminação e das áreas cobertas pela análise na imagem de referência, i.e., assume-se que a iluminação não varia ao longo do movimento e despreza-se o movimento que ocorre nas regiões não presentes na imagem[31].

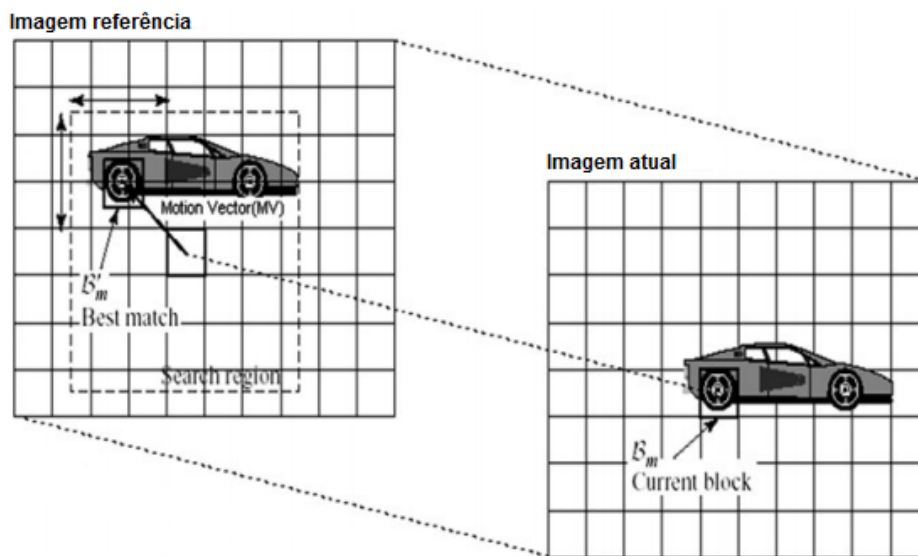


Figura 3.1 – Exemplo de algoritmo de procura baseado no método de correspondência de blocos (adaptado de[31]).

Existem três parâmetros fundamentais inerentes à implementação e utilização deste tipo de algoritmo:

- **Função de custo**

A função de custo é usada para quantificar as similaridades entre o bloco de referência e o bloco atual. O bloco na imagem atual que apresentar menor custo relativamente à referência permitirá obter o vetor movimento ótimo, i.e., aquele que traduzirá com mais exatidão o movimento do bloco selecionado. Uma função de custo traduz-se na minimização de uma determinada medida de erro. As medidas de erro mais comuns na detecção de movimento em processamento de imagem são o erro medio quadrático (MSE) e somatório das diferenças absolutas (SAD)[31].

$$MSE(\mathbf{w}_x, \mathbf{w}_y) = \frac{1}{N \cdot N} \sum_{i=x}^{x+N-1} \sum_{j=y}^{y+N-1} [F_t(i, j) - F_{(t-1)}(i + \mathbf{w}_x, j + \mathbf{w}_y)]^2 \quad (3.1)$$

$$SAD(\mathbf{w}_x, \mathbf{w}_y) = \sum_{i=x}^{x+N-1} \sum_{j=y}^{y+N-1} |F_t(i, j) - F_{(t-1)}(i + \mathbf{w}_x, j + \mathbf{w}_y)| \quad (3.2)$$

No caso do SAD, torna-se um método mais atrativo em aplicações em tempo real pois a ausência de operação multiplicação diminui o tempo de computação necessário para a obtenção do MV ótimo[31].

- **Dimensão do bloco**

Como o nome indica, trata-se do tamanho do bloco de pixéis (N*N). Quanto menor o bloco maior será o numero de blocos por imagem/região, correspondendo a um maior numero de vetores movimento, fator esse que melhora a previsão do movimento pelo facto da existência de um maior numero de vetores para a estimativa do deslocamento. Igualmente um bloco menor conterá um menor número de objetos, o que se a análise estiver a incidir sobre o movimento de um objeto específico, e o bloco for de dimensão tal que contenha outros objetos que se movimentem com características diferentes, poderão dar origem a erros de contabilização maiores[31].

Apesar da documentação analisada não referir, subentende-se que a característica da imagem tal como texturas e padrões podem influenciar a escolha do tamanho do bloco. O tamanho do bloco terá que ser sempre maior do que a área de maior dimensão do objeto constituinte do padrão e a distribuição de cor e intensidade de brilho e cor deve ser o mais uniforme.

- **Alcance da procura**

O alcance da procura é um parâmetro que define o deslocamento máximo a detetar pelo algoritmo implementado, i.e., representa a janela de procura em redor do *pixel* (em literatura aparece como o parâmetro “w” ou “pvalue”). Parâmetros de procura pequenos podem apresentar qualidade de previsão e deteção de movimento fraca, por outro lado valores elevados vão provocar sobrecarga de informação e conseqüente aumento da necessidade de processamento. Tipicamente um valor de alcance de deslocamento máximo admissível de 7 pixéis é suficiente para aplicações de baixa resolução de vídeo[31]. No entanto este valor deverá ser selecionado de forma dinâmica ou ter conhecimento prévio da amplitude do movimento por forma a obter uma deteção do movimento mais precisa e com menor computação.

Os algoritmos baseados na correspondência de blocos têm evoluído de algoritmos exaustivos de procura (mais lentos) para os algoritmos designados de procura rápida dos quais se podem destacar os que se apresentam nos pontos seguintes, existindo no entanto muitos outros estudados e devidamente documentados em literatura da área.

3.1.1.1 Procura exaustiva (*Exhaustive Search (ES)*)

Trata-se de um algoritmo de procura exaustiva, e caracteriza-se por calcular a função de custo de cada bloco para cada posição possível desse mesmo um bloco de pixéis na imagem ou região de procura selecionada. Trata-se portanto de um método lento e que exige muita computação[30].

3.1.1.2 Procura por três passos (*Three Step Search(TSS)*)

Trata-se de um dos primeiros algoritmos de procura rápida. Em suma para um determinado valor de alcance são definidos 3 passos de procura. Define-se uma determinada dimensão para o bloco, realizando-se uma procura em torno do centro a 8 pontos distintos (4 vértices do bloco e aos 4 pontos médios dos lados do bloco). O ponto que se apresentar mais próximo do alvo, é na segunda fase definido como o novo centro do bloco, sendo realizada novamente a procura aos 8 pontos distintos, sendo que agora a dimensão da janela será metade da dimensão da janela inicial. Na última fase, que corresponderá a um passo de um *pixel*, a posição que retornar menor função de custo representará, previsivelmente, a posição final dos objetos relativamente à referência, ver exemplo da figura 3.2[30].

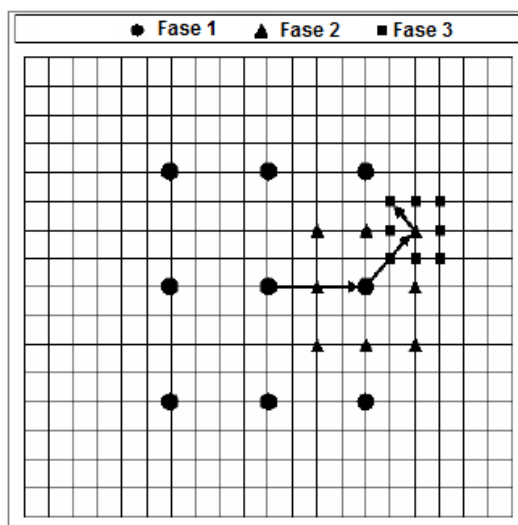


Figura 3.2 – Exemplo de procura por TSS (adaptado de[30]).

Existem muitas outras variantes deste algoritmo dos quais se podem destacar o novo algoritmo de procura por três passos (New Three Step Search (NTSS)), o algoritmo de procura por quatro passos (Four Step Search (4SS)) e o Algoritmo de procura com padrão Diamante (Diamond Search (DS)). Estes algoritmos servem de base e complemento a algoritmos mais avançados dos quais se pode destacar o algoritmo ARPS, explicado em pormenor no ponto que se segue[30].

3.1.1.3 Algoritmo de padrão cruzado adaptável (*Adaptive Rood Pattern Search (ARPS)*)

Conforme verificado anteriormente nos algoritmos estudados, pode-se concluir que padrões de procura de dimensão reduzida tendem a ser mais eficientes e precisos na deteção de movimentos mais pequenos, em comparação com padrões de procura de grande dimensão. No entanto para movimentos de grande amplitude, os padrões de procura de pequena dimensão podem erradamente tenderem para mínimos locais da função de custo utilizada para obter o MV, sendo nestes casos mais vantajoso e preciso a utilização de padrões de procura de dimensão superior. Podemos concluir que a precisão e fiabilidade dos algoritmos baseados na procura através da utilização de padrões depende da dimensão do padrão utilizado e da amplitude do movimento. Deste modo torna-se vantajoso aplicar um algoritmo capaz de se adaptar (dinâmico).

Existem portanto dois pontos importantes. Como prever a amplitude do movimento do bloco a estudar e qual o melhor padrão e dimensão a escolher. Para o primeiro caso, pode-se assumir que os blocos adjacentes a um determinado objeto em movimento terão o mesmo comportamento dinâmico, o que permite definir a amplitude do movimento com base no movimento da sua vizinhança. Relativamente ao padrão, neste caso específico será em cruz (*rood*), sendo a sua dimensão definida para cada bloco com base na previsão do movimento.

O padrão de grande dimensão corre uma única vez para cada bloco, e espera-se que se posicione o centro da procura em um mínimo absoluto. Finalmente será efetuada uma procura refinada através de um padrão fixo e de dimensão reduzida, repetindo a sua procura tantas vezes quantas necessárias para obter a menor função de custo global[23].

O vetor movimento (MV) previsto usado para a seleção da dimensão do padrão de maior dimensão será condicionado pela região de suporte selecionada e o tipo de algoritmo usado na previsão.

Os blocos na vizinhança terão uma maior correlação que outros mais afastados, deste modo tem suporte a utilização na previsão do MV de um bloco adjacente (ou um padrão adjacente), existindo regiões de suporte pré-definidas, onde a região do tipo D, ver figura 3.3, tem boa performance, com menor computação e memória de armazenamento necessária[23].

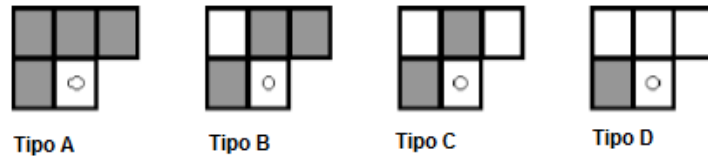


Figura 3.3 – Exemplo de regiões de suporte para prever o MV. A cinza a região de suporte e bloco com circunferência o bloco atual para o qual se pretende determinar o movimento exato (adaptado de[23])

O MV previsto é tipicamente obtido através do cálculo da média dos MV de cada *pixel* da região de suporte selecionada, podendo existir outras medidas estatísticas para o efeito[23].

Conforme mencionado anteriormente, existirá um padrão em cruz ajustável (dinâmico com base na previsão do movimento) de maior dimensão e um fixo de dimensão reduzida para o ajuste fino final. O padrão ajustável terá uma configuração em cruz, cuja dimensão do padrão ajustável terá como amplitude o valor previsto do MV obtido, podendo ou não ser simétrico. A dimensão corresponde à distância do centro do bloco no *frame* de referência à extremidade do braço da cruz. A escolha do padrão em cruz baseia-se na observação dos movimentos reais dos objetos, que se verificou serem mais frequentes na horizontal e vertical. No caso específico do trabalho realizado, os deslocamentos serão tipicamente na vertical podendo existir porem situações de rotura que podem induzir movimentos segundo o eixo horizontal. Mesmo quando o movimento analisado seja na diagonal (componente vertical e outra horizontal), o padrão cruzado terá sempre uma boa performance pois tem igualmente as duas componentes[23].

Relativamente ao padrão fixo, como na procura inicial é suposto o novo centro para a procura ser reposicionado no vértice da cruz mais próxima da localização do bloco (vértice que apresente menor função de custo) para o qual estamos a determinar a sua posição/movimento, irá reduzir o número de iterações necessárias para caracterizar o movimento do bloco. Os padrões fixos de procura a utilizar poderão ser qualquer uma das variantes dos algoritmos de correspondência de blocos anteriormente referidas, sendo que [23] refere a utilização de um padrão em cruz unitário (igual ao SDSP) ou padrão quadrado (3x3), sendo que o primeiro apresentará melhor performance[23].

A figura 3.4 apresenta um exemplo de procura para o algoritmo ARPS.

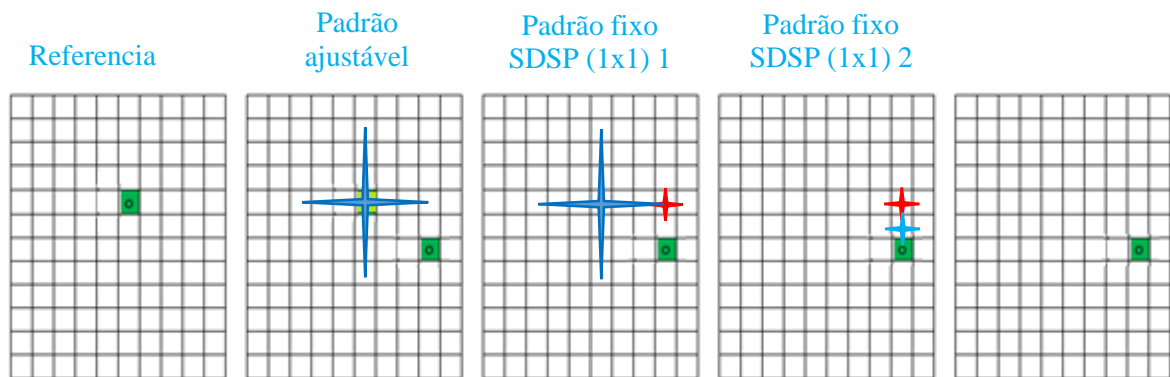


Figura 3.4 – Exemplo de procura ARPS. A verde o bloco cujo movimento queremos caracterizar.

3.1.2 Algoritmos baseados em métodos diferenciais

Para um determinado cenário 3D, se se efetuar a captura um seguimento sequencial através da captura de imagem, o movimento de um objeto contido na imagem pode ser relacionado entre cada captura pelo seu deslocamento relativo (ao nível do *pixel*). O deslocamento corresponde à projeção do movimento do objeto no plano, sendo este também denominado de fluxo ótico. O fluxo ótico é o movimento aparente do brilho em uma imagem.

Em teoria tendo a imagem anterior e o fluxo ótico de toda a imagem, seríamos capazes de construir a imagem que se seguiria pois saberíamos com exatidão a localização de cada *pixel*. O objetivo principal do cálculo do fluxo ótico será obter o vetor movimento, tipicamente designado de MV (*Motion vector*), vetor esse que fornece a direção e a velocidade de um *pixel* entre imagem, obtendo-se uma relação *pixel*/base de tempo ou *pixel*/imagem[15].

Várias técnicas foram e são desenvolvidas nesta área, sendo agrupadas em dois grandes grupos, os algoritmos locais ou globais, sendo que cada um terá associadas varias condições (restrições) para que a implementação do método seja viável [15].

Relativamente a esta dissertação em si, existe potencial na exploração de um algoritmo de cálculo baseado na obtenção do fluxo ótico, já que sabendo a relação *pixel*/imagem e *pixel*/milímetro, facilmente se obtém o deslocamento de um objeto contido em duas imagens numa sequência.

O fluxo ótico pode ser obtido entre outras técnicas precisamente através de métodos diferenciais.

Nos métodos diferenciais, a previsão de movimento baseia-se na intensidade do brilho do *pixel*, i.e., o algoritmo avalia individualmente o deslocamento de cada *pixel* usando o gradiente da intensidade do brilho de uma imagem, tratando-se deste modo de um método diferencial. Pelo facto de se efetuar

a estimativa de movimento para cada *pixel*, estes algoritmos podem exigir uma elevada capacidade de computação[30][28].

Os pilares base deste método assentam no facto de se assumir que a intensidade do brilho de um objeto se conserva de imagem para imagem, a BCCE (*brightness constancy constraint equation*) será dada pela primeira derivada do movimento da imagem[32]:

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (3.3)$$

Considerando que a amplitude dos movimentos é reduzida, a BCCE poderá ser o resultado do desenvolvimento em série de Taylor da equação anterior. Se se desprezar os termos de maior ordem, a equação da BCCE resultante poderá ser dada por[32]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial x} u_1 + \frac{\partial I}{\partial y} v_1 + \frac{\partial I}{\partial t} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} = u \quad e \quad \frac{dy}{dt} = v & \end{aligned} \quad (3.4)$$

Em que $\partial I/\partial x$ e $\partial I/\partial y$ representam a taxa de variação espacial do movimento segundo um referencial ortogonal (x,y) e, $\partial I/\partial t$ a velocidade de variação da intensidade do *pixel* relativamente ao tempo[32].

A conservação da intensidade de brilho é a base de todos os algoritmos diferenciais para determinação do fluxo ótico, no entanto esta condição só por si não pode ser tida como única para obter o movimento de uma imagem, sendo que pequenas perturbações podem dar origem a grandes variações no cálculo da derivada (da nomenclatura germânica é um problema “*ill posed*”). Este fator obriga a que sejam tidas em consideração mais algumas restrições adicionais por forma a garantir que o problema tenha solução e esta seja o mais preciso possível (da nomenclatura germânica seja um problema “*well-posed*”)[32].

Várias são as técnicas possíveis para transformar um problema que não apresente condições necessárias ao cálculo de uma solução viável e única (*ill posed*) num que apresente um output viável (*well posed*), podendo-se destacar o método de regularização Tikhonov, método de filtragem, método de suavização e interpolação, validação cruzada generalizada, etc., sendo este particular de cada algoritmo diferencial de obtenção do fluxo ótico[32][33].

Existem métodos que utilizam derivadas de primeira ordem e métodos baseados em derivadas de segunda ordem, sendo de seguida apresentados dois de cada respetivamente[34].

3.1.2.1 Algoritmo Horn e Schunck

Horn e Schunck (HS) foram dos primeiros a usar técnicas diferenciais em deteção do fluxo ótico em processamento de imagem. Trata-se de um método global que adicionalmente à BCCE, base característica dos métodos diferenciais, introduz também uma condição de suavização global da imagem, assim como HS refere também que se os deslocamentos entre imagens foram reduzidos, os níveis de cinza não irão variar de forma significativa de imagem para imagem[35]. Existem duas condições associadas a esta técnica, a de que o nível de cinza de um *pixel* não varia ao longo do tempo e que o algoritmo terá que ser aplicado sobre uma imagem globalmente suavizada. A suavização permite facilitar a determinação da velocidade do fluxo ótico, i.e., um objeto opaco finito apresenta um movimento ou deformação rígido, permitindo-nos observar um movimento mais uniforme do objeto e da vizinhança do mesmo. Um exemplo para expressar esta condição é a minimização da magnitude dos quadrados da velocidade do fluxo ótico, existindo porem outros métodos [35][36].

$$E(\mathbf{w}) = \iint_{\Omega} \left[(I_x \mathbf{u} + I_y \mathbf{v} + I_t)^2 + \alpha (|\nabla \mathbf{u}|^2 + |\nabla \mathbf{v}|^2) \right] dx dy \quad (3.5)$$

$$|\nabla \mathbf{u}| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad e \quad |\nabla \mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

A equação anterior contempla uma parcela relativa à BCCE e uma outra relativa à condição de suavização. Da equação anterior e da aplicação das condições descritas para a aplicação deste método resultam duas equações iterativas usadas no processo de obtenção da velocidade do fluxo ótico[34].

$$\mathbf{u}^{k+1} = \bar{\mathbf{u}}^k - \frac{I_x [I_x \bar{\mathbf{u}}^k + I_y \bar{\mathbf{v}}^k + I_t]}{\alpha^2 I_x^2 + I_y^2}$$

$$\mathbf{v}^{k+1} = \bar{\mathbf{v}}^k - \frac{I_y [I_x \bar{\mathbf{u}}^k + I_y \bar{\mathbf{v}}^k + I_t]}{\alpha^2 I_x^2 + I_y^2} \quad (3.6)$$

Em que $\bar{\mathbf{u}}^k$ e $\bar{\mathbf{v}}^k$ correspondem às velocidades médias da vizinhança do *pixel* $(u, v)^k$ (deslocamentos em numero de pixéis entre duas imagens [37]). O parâmetro (k) corresponde ao número de iterações necessárias para garantir uma estimativa de movimento mais precisa. Quanto maior este valor melhor será o resultado, mas maior será a necessidade de computação. O parâmetro (α) corresponde ao fator de suavização global da imagem[34].

3.1.2.2 Algoritmo Lucas e Kanade

O algoritmo Lucas e Kanade (LK), à semelhança do HS baseia-se na primeira derivada da intensidade do *pixel* e na equação BCCE.

Trata-se de um dos métodos mais comuns na obtenção do vetor movimento de uma imagem usando técnicas diferenciais locais. Tem como base o pressuposto de que o movimento de um dado *pixel* será idêntico ao da sua vizinhança. O MV é obtido através da minimização da função energética local[38].

$$E_{(u,v)} = \sum W_{(x,y)}^2 [\nabla I(x, y, t) \cdot (u, v) + I_t(x, y)]^2 \quad (3.7)$$

Onde W é o peso atribuído aos pixéis da vizinhança. Quanto mais longe estiver um *pixel* de vizinhança do *pixel* analisado menor será o seu peso, i.e., a sua influência na detecção do movimento. Ignorando o fator relativo ao peso da vizinhança (W), a função simplesmente soma o erro da aplicação do vetor (u,v) ao gradiente espacial e temporal. A solução para a equação acima representada poderá ser dada por[34][38]:

$$\begin{aligned} T \cdot W^2 \cdot A \cdot (u, v) &= A^T \cdot W^2 \cdot b \\ A &= [\nabla I(x_1, y_1), \dots, \nabla I(x_n, y_{n1})]^T \\ W &= \text{diag}[W(x_1, y_1), \dots, W(x_n, y_{n1})] \\ b &= -[I_t(x_1, y_1), \dots, I_t(x_n, y_n)] \end{aligned} \quad (3.8)$$

Este algoritmo por se tratar de um método local permite estimativas aceitáveis sem a necessidade de processamento de toda a imagem/região de análise. No entanto em imagens com regiões homogêneas de tamanho considerável, o método global (exemplo do HS) poderá apresentar melhores performances[38].

3.1.2.3 Algoritmo Nagel

Este método foi um dos primeiros algoritmos baseados nas derivadas de segunda ordem da intensidade do brilho para a obtenção do vetor movimento relativo ao fluxo ótico da imagem. À semelhança do método HS, este também tem uma condição global de suavização na sua implementação[34].

Em alternativa à condição de suavização apresentada por HS, Nagel sugere uma condição de suavização orientada, onde esta não é imposta nas transições abruptas de brilho por forma a lidar

com obstáculos ou limites de objetos. O problema terá como solução a minimização da seguinte equação[34]:

$$E(\mathbf{w}) = \iint_{\Omega} \left[(I_x \mathbf{u} + I_y \mathbf{v} + I_t)^2 + \frac{\alpha^2}{|\nabla I|_2^2 + 2\delta} \cdot A \right] dx dy$$

$$A = \left[(\mathbf{u}_x \cdot I_y - \mathbf{u}_y \cdot I_x)^2 + (\mathbf{v}_x \cdot I_y - \mathbf{v}_y \cdot I_x)^2 + \delta(\mathbf{u}_x^2 + \mathbf{u}_y^2 + \mathbf{v}_x^2 + \mathbf{v}_y^2) \right] \quad (3.9)$$

Também neste caso para que seja possível obter a melhor solução, à semelhança do algoritmo HS, será resolvido recorrendo a duas funções iterativas baseadas no método Gauss–Seidel[34].

4

Ferramenta desenvolvida para medição de deslocamentos

Neste capítulo apresenta-se a ferramenta desenvolvida para cálculo de deslocamentos.

4.1 Programa utilizado

A interface gráfica com o utilizador é uma janela que permite a visualização de diversas variáveis assim como a interação entre o utilizador e um programa, através de simples operações de controlo sem necessidade de efetuar qualquer programação nas linhas de comandos. O utilizador não necessita de perceber como o programa funciona para realizar uma determinada tarefa. As interfaces gráficas contêm menus, tabelas, botões, etc...[39].

A vantagem de elaborar tanto a base do programa assim como a interface gráfica através do MATLAB®, é o facto de ser possível numa só aplicação realizar qualquer operação de computação, ler e escrever ficheiros, comunicar com outras interfaces, apresentar gráficos, entre outras funcionalidades, recorrendo a um único *software*, programa esse largamente difundido pelo ramo da engenharia, podendo ser uma ferramenta a estar disponível em uma sala de aula[39]. Tendo em conta que se trata de uma ferramenta aberta, facilmente poderá ser adicionado novas funcionalidades.

4.2 Características da ferramenta computacional desenvolvida

4.2.1 Organização da estrutura do programa

O programa está organizado por janelas, representando os diversos níveis do programa.

Foram implementadas também funções (sub-rotinas) que são chamadas ao longo do programa, permitindo uma simplificação do código definido nos ficheiros relativos às janelas, assim como uma partilha entre algoritmos de sub-rotinas presentes em ambos. Cada janela irá conter código para realização de uma tarefa específica.

4.2.2 Resumo das principais funções da ferramenta desenvolvida

A ferramenta implementada tem como base os algoritmos de procura ARPS (implementação baseada em [40]) e o HS (implementação baseada em [41]). Cada um foi implementado de forma distinta, permitindo determinar, para cada caso de estudo, qual dos algoritmos apresenta maior precisão na medição dos deslocamentos realizados por um determinado objeto ou região de uma imagem.

A região de interesse para análise é definida pelo utilizador diretamente no ecrã, através da seleção com o cursor dos 4 vértices do quadrado/retângulo respetivos à área pretendida. Esta seleção será válida para ambos os algoritmos.

O processo de calibração da camara é muito versátil, permitindo que seja o utilizador a realizar essa ação sem necessidade de alteração da programação, estando implementados dois métodos para tal. Um dos casos será a introdução manual do valor numérico da referência “nº *pixéis*” e a respetiva correspondência em milímetros. O segundo método será definindo essa referência com auxílio do ecrã, ou seja, sabendo a dimensão física em mm de um determinado objeto na imagem, selecionar os dois pontos de um segmento de reta correspondente a essa distância. Esta característica permite uma total adaptação da ferramenta a qualquer câmara fotográfica, independentemente da resolução ou *zoom* aplicado ao conjunto de imagens recolhido a quando do ensaio físico.

Definida a região de interesse e a calibração da camara, o próximo passo será a seleção do algoritmo pretendido. A ferramenta permite a escolha de qualquer um dos dois algoritmos implementados.

Em cada algoritmo, o utilizador poderá ajustar os parâmetros característicos respetivos, normalmente o tamanho do bloco e o alcance da procura no caso do algoritmo ARPS, e o número de iterações e o coeficiente de suavização no caso do algoritmo HS, garantindo deste modo um ajuste fino para obter o melhor resultado. O utilizador poderá simular vários cenários com parâmetros diferentes e/ou algoritmos diferentes, permitindo deste modo uma comparação dos resultados obtidos.

O resultado do processamento de imagem para qualquer um dos algoritmos poderá ser analisado sobre a forma de tabelas ou gráficos. Para facilitar a análise de dados, a análise está dividida entre movimento horizontal (*ox*) ou vertical (*oy*), existindo no entanto a possibilidade de analisar o movimento combinado relativamente aos valores obtidos para o deslocamento através do processamento de imagem, assim como gerar um gráfico com a evolução dos vetores movimentos calculados.

Existe ainda a possibilidade de, para além dos dados calculados com base no processamento de imagem e os dados de referência obtidos no ensaio recorrendo ao método tradicional, selecionar um ensaio previamente gravado para comparação, independentemente se foi gerado pela ferramenta apresentada ou se foi obtida através de um outro método, bastando somente estar de acordo com as especificações de ficheiro definidas.

A opção para visualizar dados em forma de tabela, permite mostrar os valores dos deslocamentos parciais e acumulado relativo a cada ensaio, o valor do desvio, medidas de erro definidas para cada caso assim como o valor do erro absoluto em milímetros e em percentagem. Apesar de [31] referir

que estas são medidas comuns de erro em processamento de imagem, outras medidas de erro poderão ser usadas. Nesta janela existe também a oportunidade de abrir uma calculadora auxiliar (baseado em [42]) para qualquer cálculo rápido que se pretenda realizar com algum dos valores presentes na tabela. Existe também a possibilidade de gravar os valores calculados do deslocamento parcial através do processamento de imagem em um ficheiro de texto, gerando assim um ficheiro contendo as condições do teste e um segundo ficheiro contendo os valores de deslocamento perfeitamente formatados para serem usados em comparações futuras.

A opção para visualizar os gráficos permite selecionar individualmente quatro opções. A observação do gráfico do deslocamento acumulado, o gráfico do erro absoluto acumulado, os histogramas do erro absoluto e parcial assim como a observação do mapa de deslocamentos da ROI acumulado através do processamento de imagem comparativamente com o deslocamento físico da imagem. Esta opção assim como a relativa ao gráfico do deslocamento acumulado podem ser gerados automaticamente ou passo a passo.

Para um dado ensaio, a interface de seleção da região de interesse, a interface para determinação do movimento a partir de um algoritmo específico assim como as tabelas e gráficos são apresentados em ecrãs distintos. Sempre que uma dada opção abre uma janela, é gravada em memória uma base de dados contendo os dados de ensaio. Esta característica tem como vantagem testar de forma rápida alguma alteração que se realize nos parâmetros característicos sem necessidade de correr todo o programa. Outra vantagem será que, para uma determinada região de interesse, poderemos fechar o programa e retomar em outra altura o ensaio, correndo e testando qualquer um dos algoritmos com base nessas mesmas variáveis, não sendo necessário selecionar novamente uma nova região, garantindo que as condições de referência se mantêm inalteradas.

Com base na análise de ambos os algoritmos poderemos concluir que influência terá o padrão ou a amplitude máxima do deslocamento, nos valores obtidos para cada método, assim como a dos parâmetros característicos específicos, permitindo determinar no futuro qual a técnica mais adequada a cada caso assim como o algoritmo mais fiável e preciso.

Os valores obtidos através do processamento de imagem serão sempre comparados com os valores registados em ensaio físico utilizando um método convencional de medida, permitindo aferir os resultados calculados. Há ainda a opção de se comparar os resultados com os dados de um determinado ensaio obtido através de um outro método.

4.2.3 Fluxograma do programa

Pretende-se neste ponto apresentar um fluxograma simplificado do programa implementado. Para tal foi definido a apresentação por janelas. Tanto para o algoritmo ARPS como para o HS, a geração de tabelas e gráficos são, do ponto de vista funcional, idênticas tendo algumas adaptações do algoritmo às características específicas de cada um. O diagrama seguinte representa de forma simplificada essa mesma estrutura.

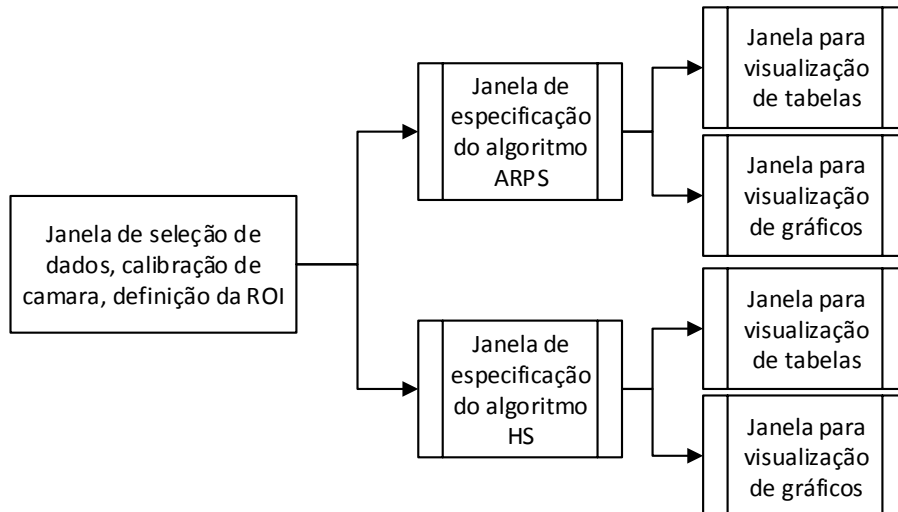


Figura 4.1 – Diagrama de blocos simplificado da organização do programa.

Nas páginas seguintes serão apresentados em pormenor cada um dos blocos representativos das janelas indicadas na figura assim como uma representação gráfica da respetiva das mesmas, onde se poderá observar as opções disponíveis para seleção.

No caso das janelas relativas aos algoritmos e à visualização de gráficos e tabelas, estas só serão apresentadas apenas para um dos algoritmos, uma vez que serão semelhantes em ambos. Do ponto de vista da interface com o utilizador, as principais diferenças centram-se na seleção dos parâmetros característicos de cada algoritmo.

Nos anexos serão apresentados os fluxogramas mais detalhados para melhor compreensão das características específicas do programa.

• Fluxograma da janela de seleção de dados, calibração de camara, definição da ROI

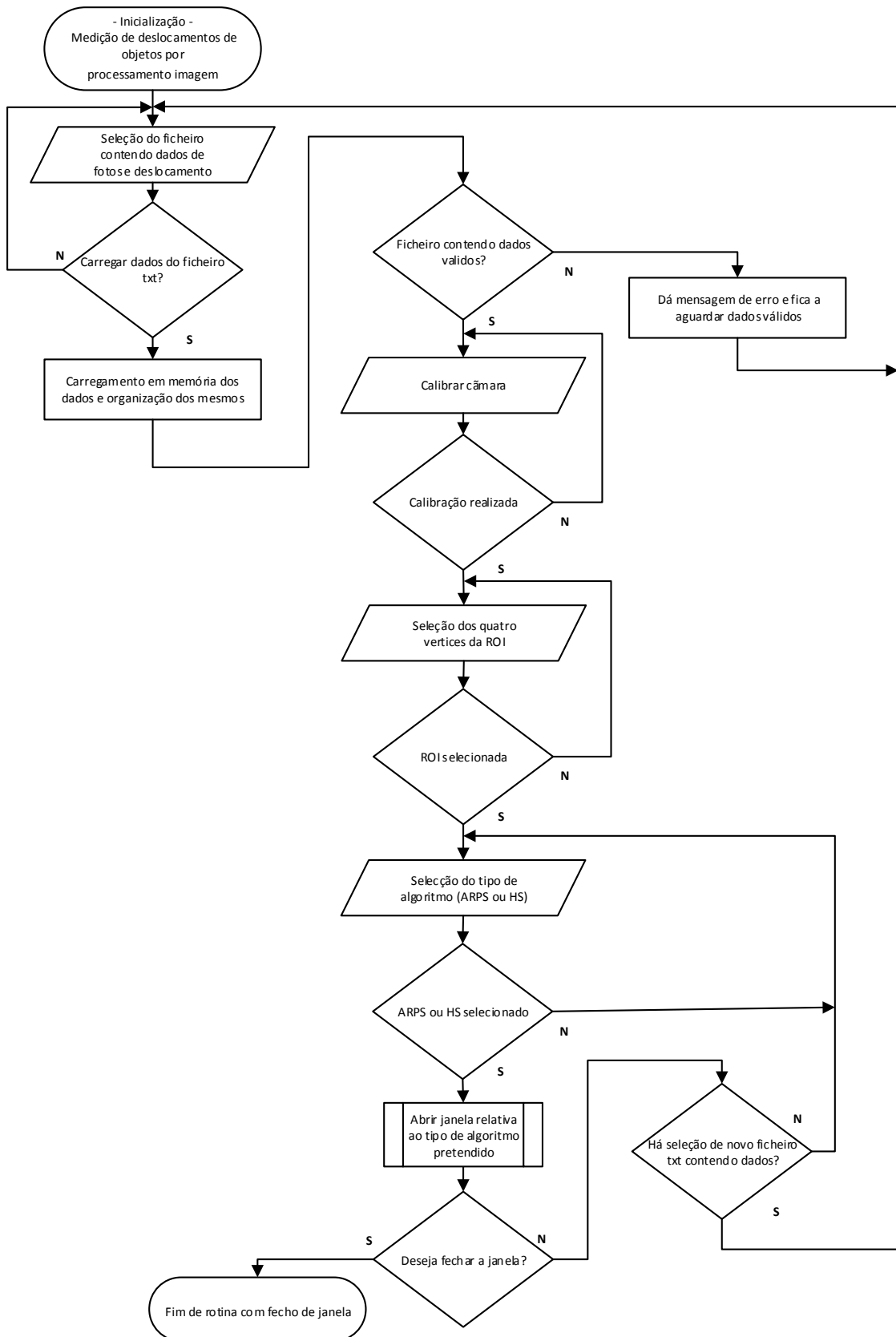


Figura 4.2 – Fluxograma da janela de seleção de dados, calibração de camara, definição da ROI.

O programa está estruturado de forma a ir permitindo a seleção de opções de forma sequencial, baseado na sequência lógica de processamento, ou seja, primeiro seleciona-se os dados do ensaio físico e imagens registadas no ensaio. De seguida calibra-se a camara com base na imagem de referência, seleciona-se a região de interesse a analisar e finalmente o tipo de algoritmo a usar na determinação dos deslocamentos através de processamento de imagem, tal como se pode ver na imagem 4.2 e 4.3.

- **Representação gráfica da janela de seleção de dados, calibração de camara, definição da ROI**



b)

Figura 4.3 – Aspeto visual da janela de seleção de dados, calibração de camara, definição da ROI após preenchimento dos campos obrigatórios.

- Fluxograma da janela de especificação do algoritmo (ARPS ou HS)

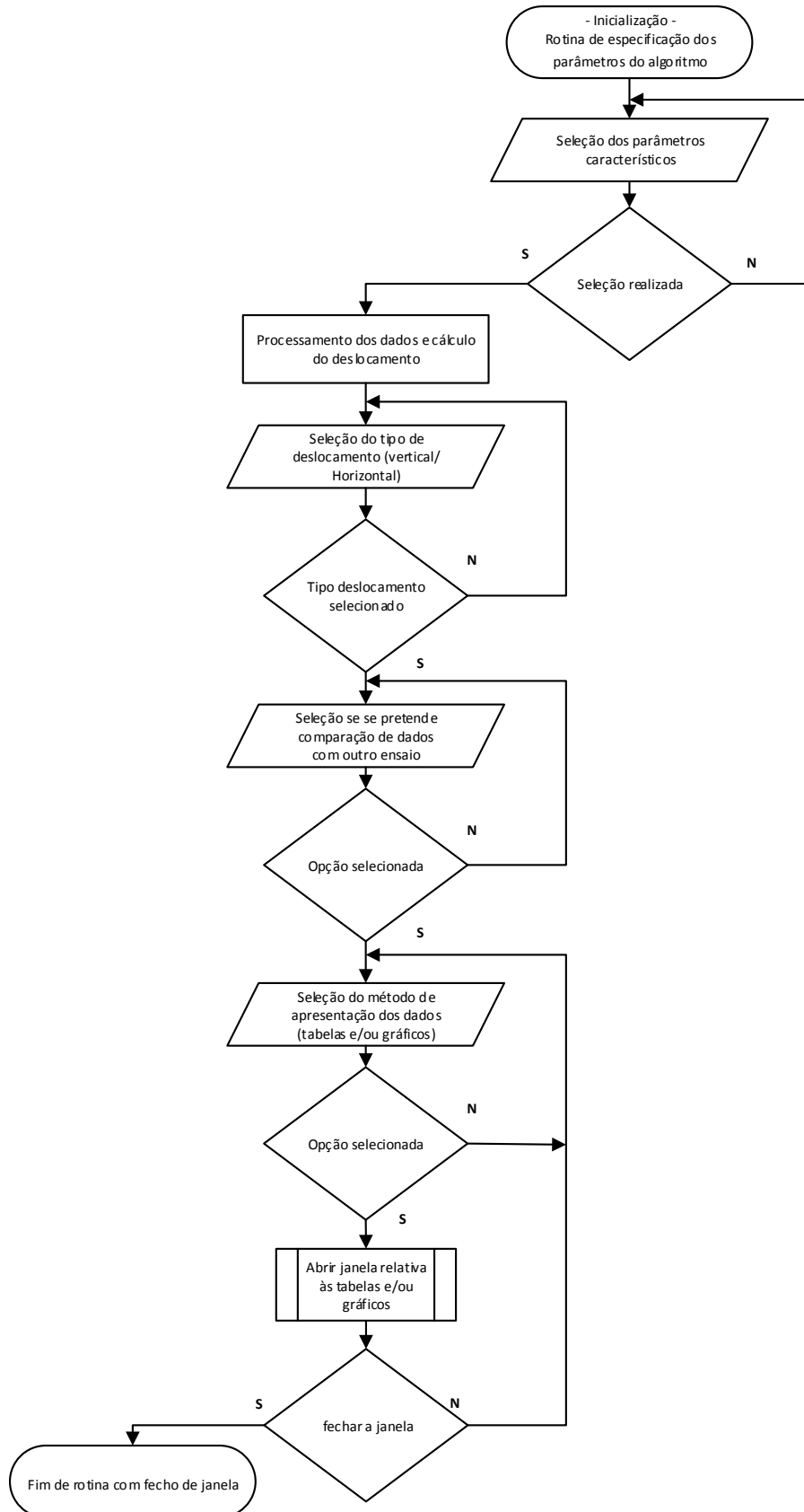


Figura 4.4 – Fluxograma da janela de especificação do algoritmo (exemplo para o ARPS).

Também nesta janela é usada a estrutura anterior. Primeiro seleciona-se os parâmetros característicos do algoritmo e calcula-se os deslocamentos com base nesses mesmos parâmetros. De seguida seleciona-se o tipo de deslocamento que se pretende apresentar e estudar. Finalmente define-se se se pretende comparar os dados físicos e os calculados por processamento de imagem com um ensaio previamente gravado. Os dados serão apresentados em tabelas ou gráficos mediante a seleção do utilizador.

A representação gráfica seguinte será para o algoritmo ARPS (figura 4.3 e 4.5), sendo que para o algoritmo HS será idêntica, somente muda a seleção dos parâmetros característicos.

- **Representação gráfica da janela de especificação do algoritmo (ARPS ou HS)**



Figura 4.5 – Aspeto visual da Janela de especificação do algoritmo após preenchimento dos campos obrigatórios.

• Fluxograma da janela para geração de tabelas

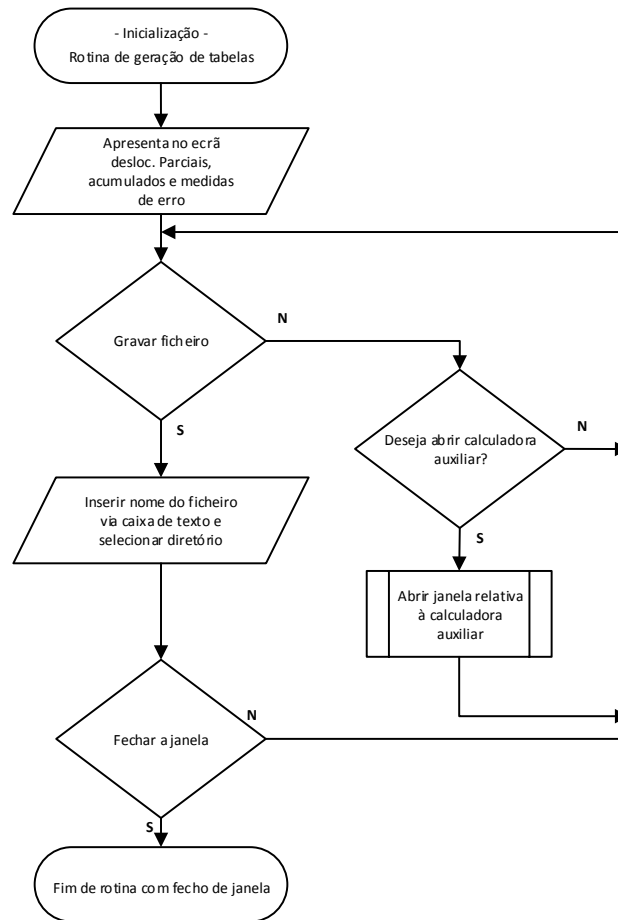


Figura 4.6 – Fluxograma da janela para geração de tabelas.

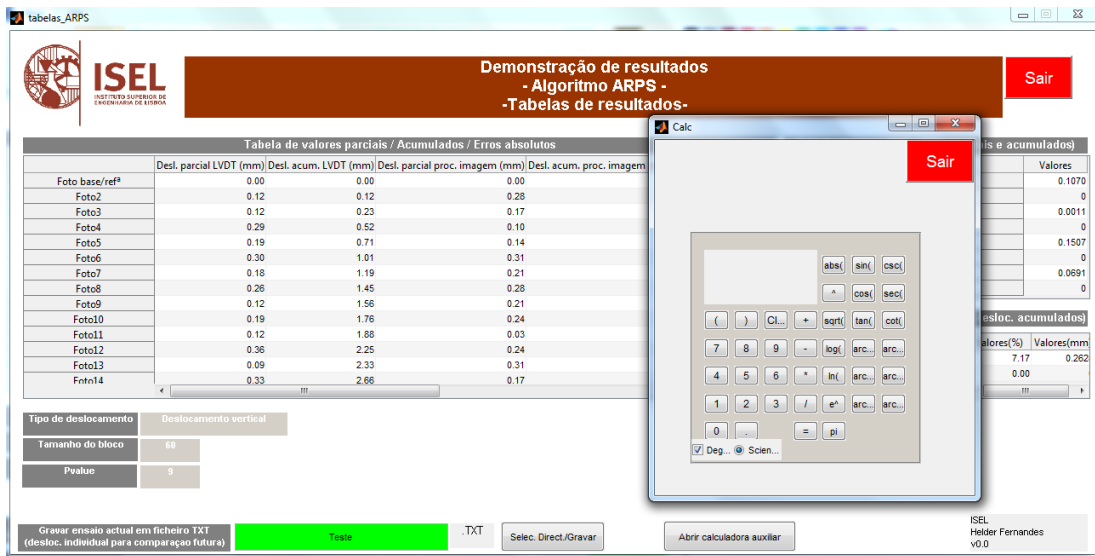
A janela para geração de tabelas permite visualizar os deslocamentos parciais e acumulados de todos os ensaios carregados, ou seja, o deslocamento físico registado (através de método tradicional e/sensor da máquina), o deslocamento calculado através do processamento de imagem e, se existir, de um ensaio previamente gravado. São apresentados também valores das medidas de erro mais comuns usadas em processamento de imagem.

Existe também a possibilidade de se gravar as características do ensaio assim como os dados relativos ao deslocamento parcial calculado através do processamento de imagem, perfeitamente formatado para se carregar novamente na ferramenta possibilitando comparações futuras, conforme apresentado nas figuras 4.6 e 4.7.

○ Representação gráfica



a)



b)

Figura 4.7 – Aspeto visual da Janela para gerar tabelas- a) Aspeto no arranque – b) Aspeto após seleção da opção calculadora e gravação de ficheiro contendo dados do ensaio.

• Fluxograma da janela para geração de gráficos

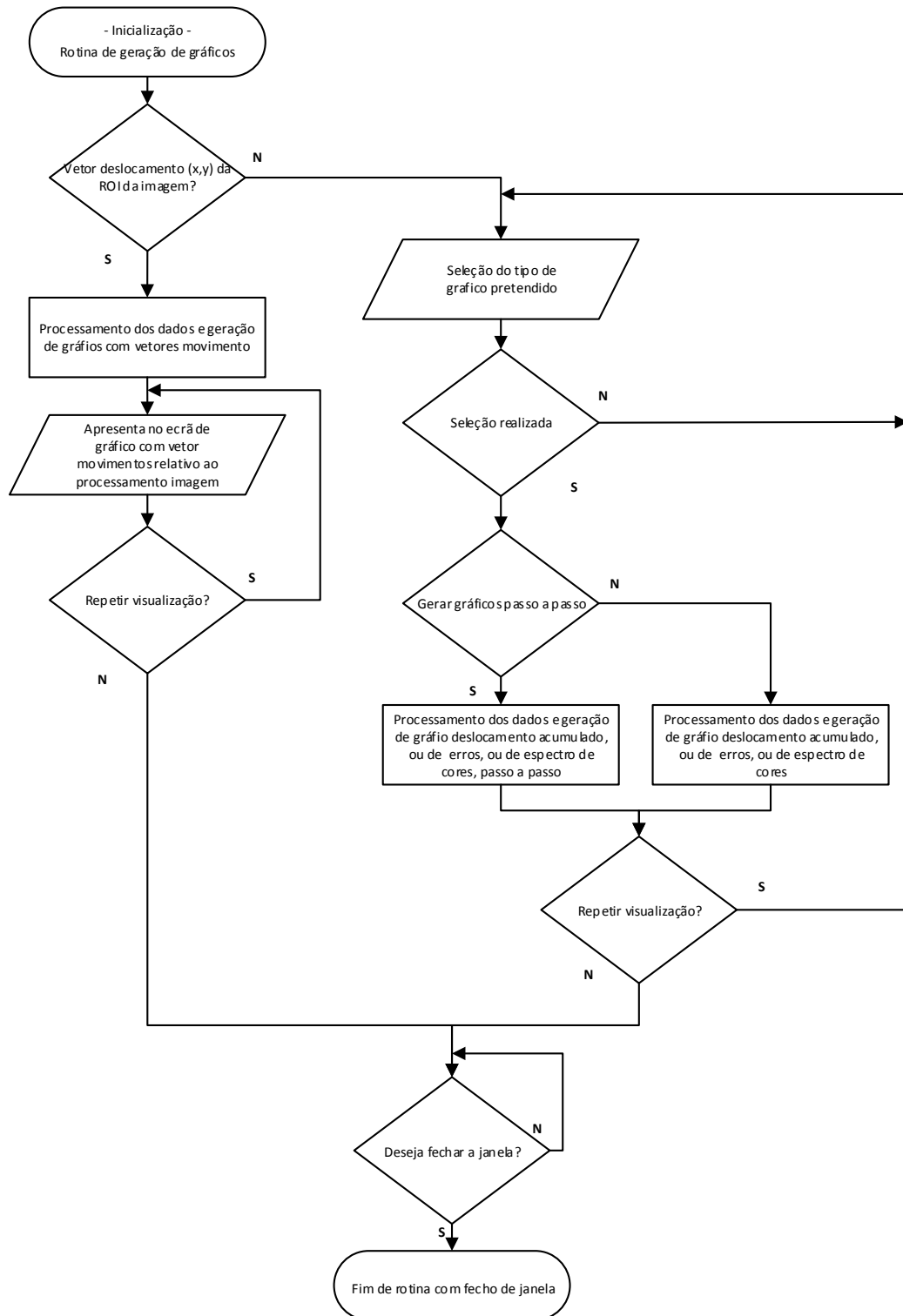


Figura 4.8 – Fluxograma da janela para geração de gráficos (para o algoritmo ARPS).

Relativamente à geração de gráficos, mediante a seleção na janela do algoritmo em uso, assim se poderá ter diferenças nas opções disponíveis. Se se selecionar no algoritmo a visualização do vetor movimento (x,y) relativo ao processamento de imagem, na janela de gráficos estará disponível somente a opção para visualizar o vetor deslocamento de cada bloco ou *pixel* da ROI, dependendo se trate do algoritmo ARPS ou HS respetivamente, existindo porem outras opções de seleção conforme se pode constatar através da observação e análise das figuras 4.8 e 4.9.

○ **Representação gráfica**

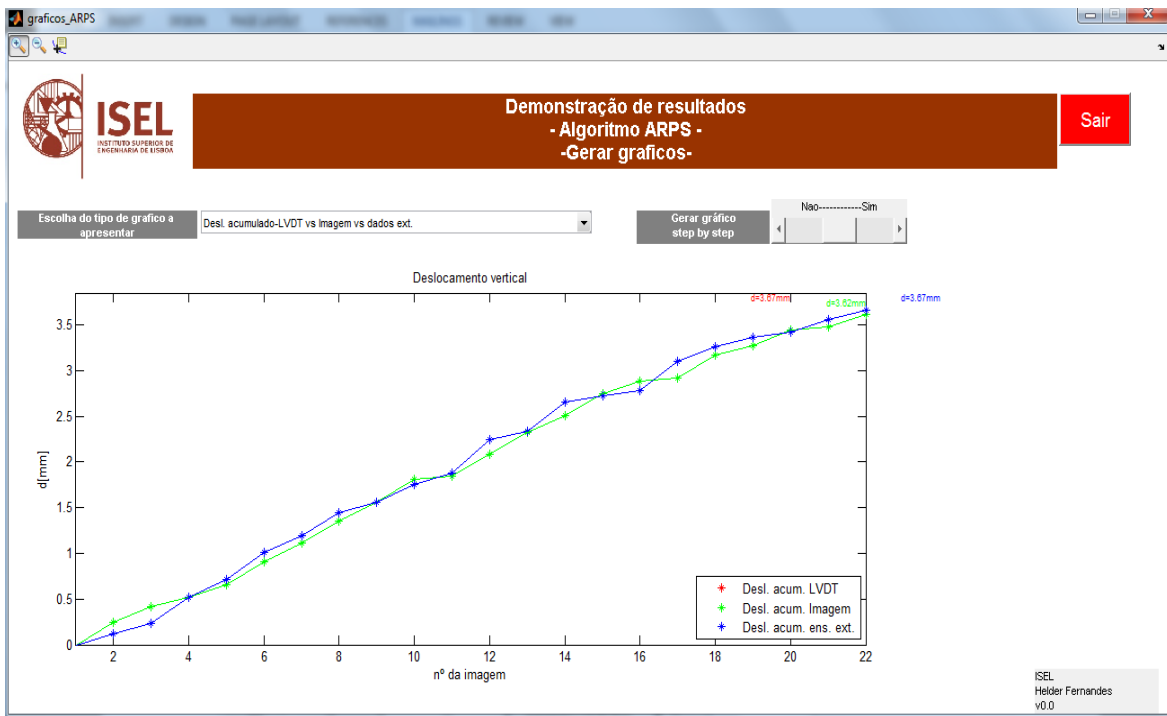


Figura 4.9 – Aspeto visual da Janela para gerar gráfico (para o algoritmo ARPS) após seleção da opção para visualizar gráfico de deslocamentos acumulados.

5

Casos de estudo

Pretende-se apresentar 5 casos de estudo para determinação de deslocamentos por processamento de imagem, com respetiva validação de resultados através de medição obtida por método tradicional.

5.1 Estudo de casos

No presente capítulo será apresentado o estudo de 5 casos, sendo 4 deles experimentais com dados obtidos através de ensaio convencional (ou por LVDT ou por sensor de deslocamento da própria máquina usada no ensaio). Para os casos práticos, foram usados diferentes materiais, sendo possível analisar o comportamento dos mesmos no que diz respeito ao movimento. Esta é uma característica interessante que permitirá tirar conclusões sobre a potencialidade do processamento de imagem nestes casos.

Existe também um ensaio teórico para comparação das limitações/potencialidades dos algoritmos em estudo, em particular do algoritmo HS.

Os casos de estudo a apresentar serão subdivididos e apresentados em 3 categorias:

- Ensaio de tração realizados no âmbito desta dissertação
 - Ensaio 1 – Ensaio realizado com provete de polímero
 - Ensaio 2 – Ensaio realizado com provete de acrílico
 - Ensaio 3 – Ensaio realizado com provete de PVC expandido
- Ensaio de compressão/flexão realizado com recurso a dados físicos cedidos pelo orientador
 - Ensaio 4 – Ensaio realizado com provete de acrílico
- Ensaio de compressão/flexão teórico com deslocamentos verticais e horizontais
 - Ensaio 5 – Deslocamento *pixel a pixel* gerado em Matlab

5.1.1 Ensaio de tração realizados no âmbito desta dissertação

Os três ensaios realizados especificamente para esta dissertação foram realizados com recurso ao laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEL. Tiveram como objetivo determinar a potencialidade dos algoritmos e ferramenta implementada para determinação dos deslocamentos de um provete em um ensaio de carga de tração com recurso a processamento de imagem, assim como ter contacto real com toda a operação de preparação e realização de um ensaio de carga em ambiente laboratorial.

Os três ensaios foram realizados com recurso a três provetes de materiais de características diferentes e, cujo padrão aleatório foi manualmente implementado.

O padrão aleatório tem como objetivo permitir que o algoritmo detete com maior facilidade os deslocamentos em todo o objeto, verifique-se ou não rutura, contrariamente a um padrão uniforme.

As condições específicas criadas para os ensaios, assim como o equipamento utilizado no ensaio são apresentados de seguida:

- Camara fotográfica marca Canon, modelo 1000 EOS. Tempo de amostragem 5 em 5 segundos.
- Foco de luz LED branco 50W para uniformização do brilho da imagem.
- Máquina de ensaio de laboratório marca Shimadzu Corporation, modelo AG-1/50N-10KN.
- Três provetes de ensaio de materiais diferentes e com padrões aleatórios.
 - Padrão do provete do ensaio 1 (provette de polímero)



Figura 5.1 – Provete ensaio 1.

- Padrão do provete do ensaio 2 (provette de acrílico)



Figura 5.2 – Provete ensaio 2.

- Padrão do provete do ensaio 3 (provette de PVC)



Figura 5.3 – Provete ensaio 3.

5.1.1.1 Ensaio 1 – Ensaio realizado com provete de polímero

Através da tabela seguinte pretende-se apresentar as condições resumidas do ensaio físico assim como dos parâmetros característicos respetivos a cada algoritmo definidos na ferramenta elaborada, com vista a comparar a performance de ambos.

TIPO DE ENSAIO	TRAÇÃO		
MATERIAL	POLIMERO		
EQUIPAMENTO DE ENSAIO	MÁQUINA DE ENSAIO DO LABORATORIO DE MECANICA EXPERIMENTAL		
ALGORITMO ARPS		ALGORITMO HS	
TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL	TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL
TAMANHO DO BLOCO	75	ITERAÇÕES	100
P	7	ALFA	1

Tabela 5.1 - Tabela com indicação de características resumidas do ensaio.

Com base nos parâmetros característicos selecionados para cada algoritmo, foi possível obter o seguinte deslocamento acumulado:

	DESLOCAMENTO PARCIAL ENTRE IMAGENS CONSECUTIVAS			DESLOCAMENTO ACUMULADO		
	DESLOCAMENTO FISICO	DESL. POR PROC. DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)	DESLOCAMNTO FISICO	DESL. POR PROC DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)
IMAGEM REF ^a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 2	0.260	0.269	0.051	0.260	0.269	0.051
IMAGEM 3	0.270	0.404	0.018	0.530	0.673	0.069
IMAGEM 4	0.340	0.404	0.033	0.870	1.077	0.102
IMAGEM 5	0.420	0.404	0.030	1.290	1.481	0.132
IMAGEM 6	0.420	0.404	0.040	1.710	1.886	0.172
IMAGEM 7	0.340	0.404	0.039	2.050	2.290	0.211
IMAGEM 8	0.570	0.404	0.038	2.620	2.694	0.249
IMAGEM 9	0.340	0.404	0.032	2.960	3.098	0.281
IMAGEM 10	0.420	0.404	0.029	3.380	3.502	0.311
IMAGEM 11	0.420	0.404	0.040	3.800	3.906	0.351
IMAGEM 12	0.340	0.404	0.044	4.140	4.310	0.395
IMAGEM 13	0.570	0.404	0.048	4.710	4.714	0.443
IMAGEM 14	0.340	0.404	0.055	5.050	5.118	0.497
IMAGEM 15	0.420	0.404	0.057	5.470	5.522	0.554
IMAGEM 16	0.420	0.404	0.053	5.890	5.926	0.607
IMAGEM 17	0.340	0.404	0.046	6.230	6.330	0.653
IMAGEM 18	0.570	0.404	0.059	6.800	6.734	0.712
IMAGEM 19	0.340	0.404	0.054	7.140	7.138	0.766
IMAGEM 20	0.420	0.404	0.059	7.560	7.542	0.825
IMAGEM 21	0.420	0.404	0.049	7.980	7.946	0.873
IMAGEM 22	0.340	0.404	0.043	8.320	8.350	0.916
IMAGEM 23	0.570	0.404	0.050	8.890	8.754	0.966

a)

ERRO ABSOLUTO VALOR ACUMULADO		
ALGORITMO	%	mm
ARPS	1.53%	0.136
HS	89.13%	7.924

b)

Tabela 5.2 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio físico e por processamento de imagem; b)

Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.

Pode-se claramente concluir que o algoritmo ARPS apresenta uma boa performance quando comparado com o HS. O erro relativo ao deslocamento total acumulado do algoritmo ARPS quando comparado com o registo físico foi inferior a duas décimas de milímetro num deslocamento acumulado de cerca de nove milímetros, conforme se pode verificar na tabela 5.2 e na figura 5.4.

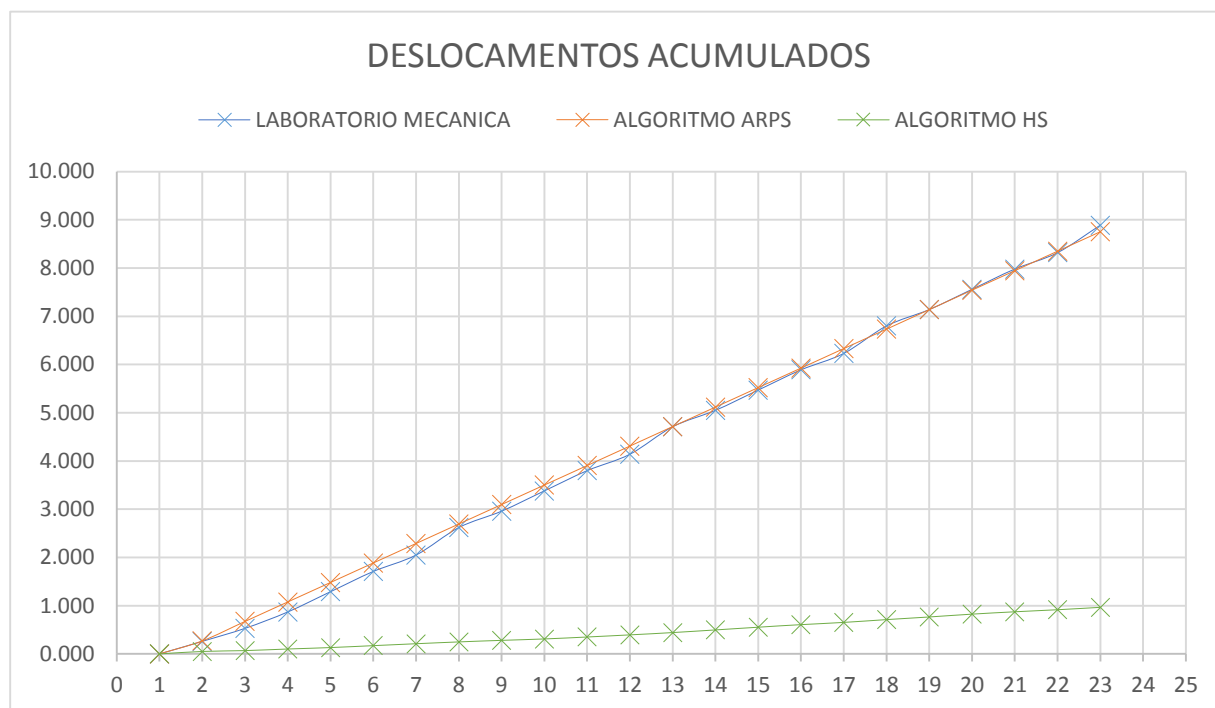


Figura 5.4 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.

A análise de pequenos deslocamentos usando o método de medição com células de carga coladas ao material, para além de o elemento adesivo poder influenciar os resultados da medida, poderá também ocorrer um deslocamento do material ou roturas em pontos onde a célula não se encontra aplicada, inviabilizando todo o ensaio. Através do processamento de imagem verifica-se que, apesar de os provetes serem do mesmo material, estes apresentaram características de movimento diferentes, sendo o método de processamento de imagem mais abrangente.

A figura seguinte demonstra precisamente um desses casos, isto é, poderíamos esperar que a rotura ocorresse mais ou menos ao centro do provete onde este apresenta maior fragilidade, no entanto podemos verificar que essa rotura ocorre imediatamente após a zona de suporte. Uma célula de carga ao centro poderia não ter registado um deslocamento coerente com o comportamento do material.

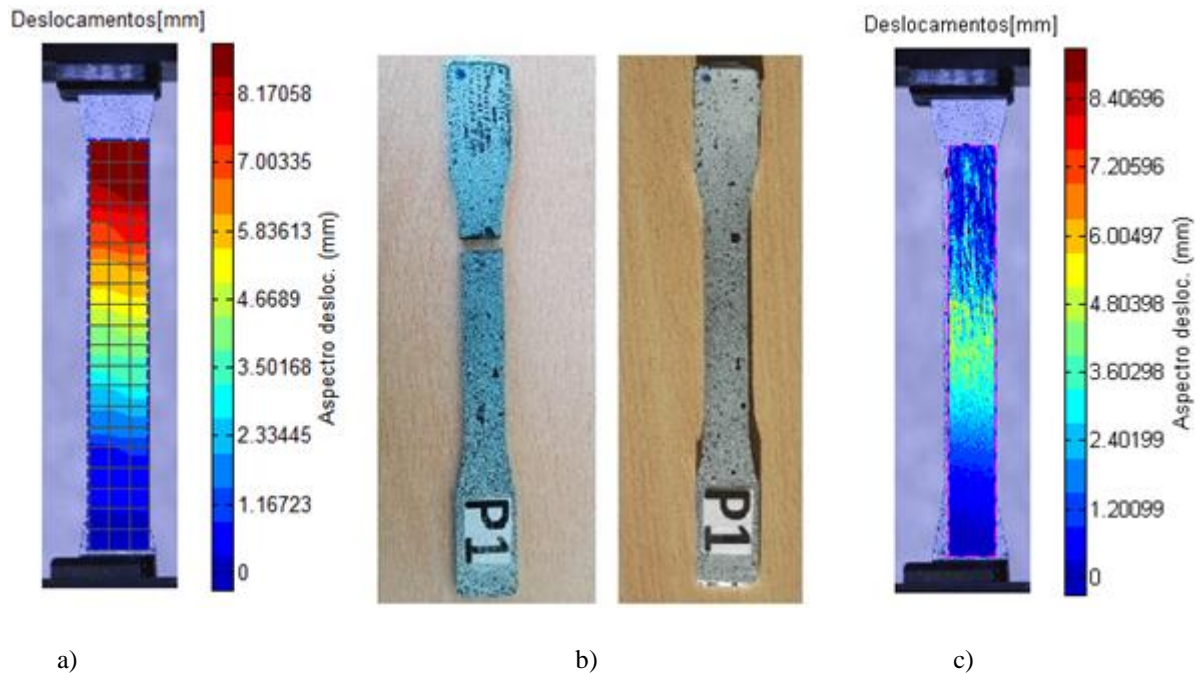


Figura 5.5 – a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostras antes e apos ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.

A análise da figura resultante do espectro de cores do deslocamento de cada bloco (figura 5.5), com recurso ao algoritmo ARPS, permite determinar visualmente a região de rotura do provete. Uma célula de carga colocada a meio, neste caso, teria registado um deslocamento que não traduziria o comportamento da totalidade do provete. Toda a região acima da zona de rotura se move uniformemente, sendo o seu deslocamento acumulado relativo ao deslocamento registado no sensor da máquina usado no ensaio.

No caso de algoritmo HS, não se observa um deslocamento coerente com a evolução do movimento. Acima da zona de rotura, aparenta ter ocorrido um movimento mais uniforme que na zona inferior. Este fenómeno poderá estar relacionado não só com o algoritmo, assim como com a característica elástica/plástica do material.

Contrariamente ao acrílico e ao PVC, no provete de polímero a tinta não apresentou a mesma aderência, o que quando sujeito a força exterior estalou criando superfícies que se moviam e outras que se mantinham estáticas em vizinhanças próximas. O algoritmo HS apresentou uma maior sensibilidade a este fenómeno que gerou um movimento não uniforme e com acentuadas discontinuidades, pelo que o valor acumulado se situam muito aquém do esperado.

5.1.1.2 Ensaio 2 – Ensaio realizado com provete de acrílico

Através da tabela seguinte pretende-se apresentar as condições resumidas do ensaio físico assim como dos parâmetros característicos respetivos a cada algoritmo definidos na ferramenta elaborada, com vista a comparar a performance de ambos.

TIPO DE ENSAIO	TRAÇÃO		
MATERIAL	ACRILICO		
EQUIPAMENTO DE ENSAIO	MÁQUINA DE ENSAIO DO LABORATORIO DE MECANICA EXPERIMENTAL		
ALGORITMO ARPS		ALGORITMO HS	
TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL	TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL
TAMANHO DO BLOCO	65	ITERAÇÕES	100
P	7	ALFA	1

Tabela 5.3 - Tabela com indicação de características resumidas do ensaio.

Com base nos parâmetros característicos selecionados para cada algoritmo, foi possível obter o seguinte deslocamento acumulado:

	DESLOCAMENTO PARCIAL ENTRE IMAGENS CONSECUTIVAS			DESLOCAMENTO ACUMULADO		
	DESLOCAMENTO FISICO	DESL. POR PROC. DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)	DESLOCAMENTO FISICO	DESL. POR PROC DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)
IMAGEM REF ^a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 2	0.050	0.073	0.046	0.050	0.073	0.046
IMAGEM 3	0.050	0.073	0.060	0.100	0.146	0.105
IMAGEM 4	0.070	0.073	0.041	0.170	0.218	0.146
IMAGEM 5	0.080	0.073	0.051	0.250	0.291	0.197
IMAGEM 6	0.080	0.073	0.051	0.330	0.364	0.248
IMAGEM 7	0.070	0.073	0.053	0.400	0.437	0.302
IMAGEM 8	0.110	0.073	0.060	0.510	0.510	0.362
IMAGEM 9	0.070	0.073	0.045	0.580	0.583	0.407
IMAGEM 10	0.080	0.073	0.048	0.660	0.655	0.456
IMAGEM 11	0.080	0.073	0.049	0.740	0.728	0.505
IMAGEM 12	0.070	0.073	0.053	0.810	0.801	0.558
IMAGEM 13	0.110	0.073	0.046	0.920	0.874	0.603
IMAGEM 14	0.070	0.073	0.047	0.990	0.947	0.650
IMAGEM 15	0.080	0.073	0.043	1.070	1.020	0.693
IMAGEM 16	0.080	0.073	0.047	1.150	1.092	0.741

a)

ERRO ABSOLUTO VALOR ACUMULADO		
ALGORITMO	%	mm
ARPS	5.01	1.092
HS	35.58	0.741

b)

Tabela 5.4 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio físico e por processamento de imagem; b)

Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.

Pode-se claramente concluir novamente que o algoritmo ARPS apresenta uma boa performance quando comparado com o HS. Para pequenos deslocamentos, o algoritmo HS apresenta uma diminuição do erro absoluto acumulado, no entanto continua a apresentar um desvio significativo do valor físico registado, conforme se pode constatar com a análise da tabela 5.4 e da figura 5.6.

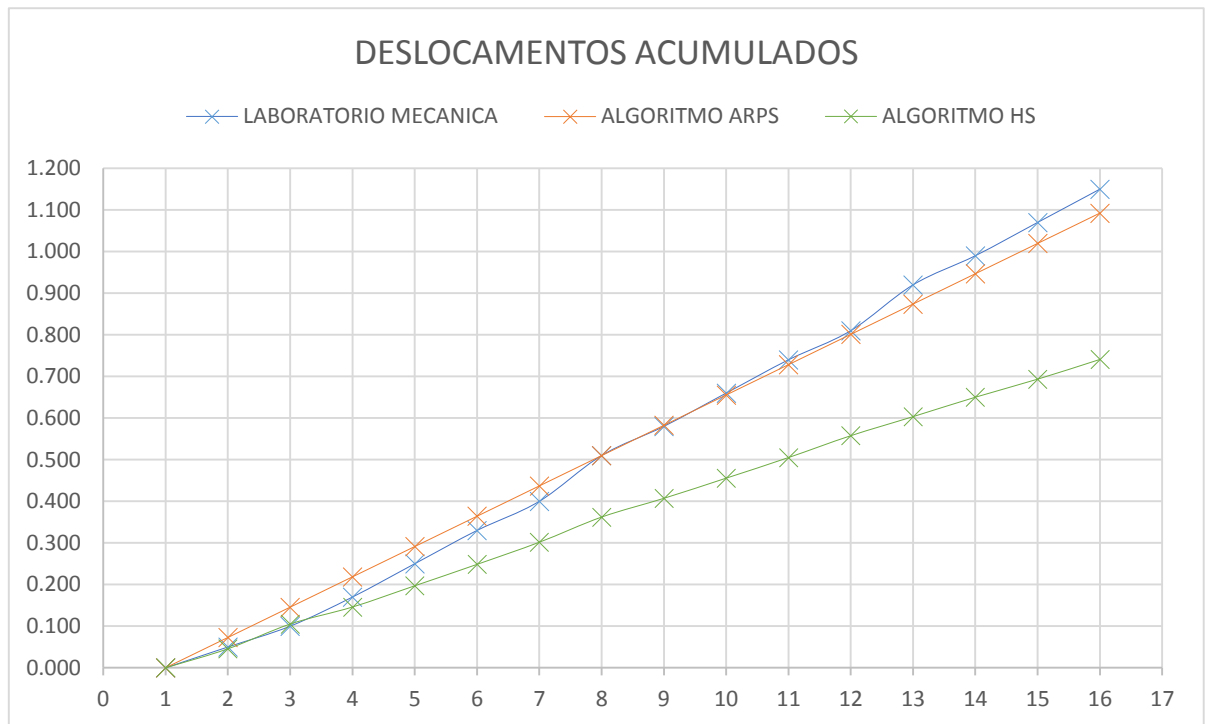


Figura 5.6 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.

Apesar de o algoritmo HS continuar a apresentar uma performance baixa e pouco precisa, podemos verificar que com o provete de PVC, o fenómeno que se tinha verificado anteriormente relativo à aderência da tinta não se verificou, o que permitiu obter um comportamento mais homogéneo acima da zona de rotura, apesar de em amplitude o valor acumulado continuar muito inferior ao movimento físico.

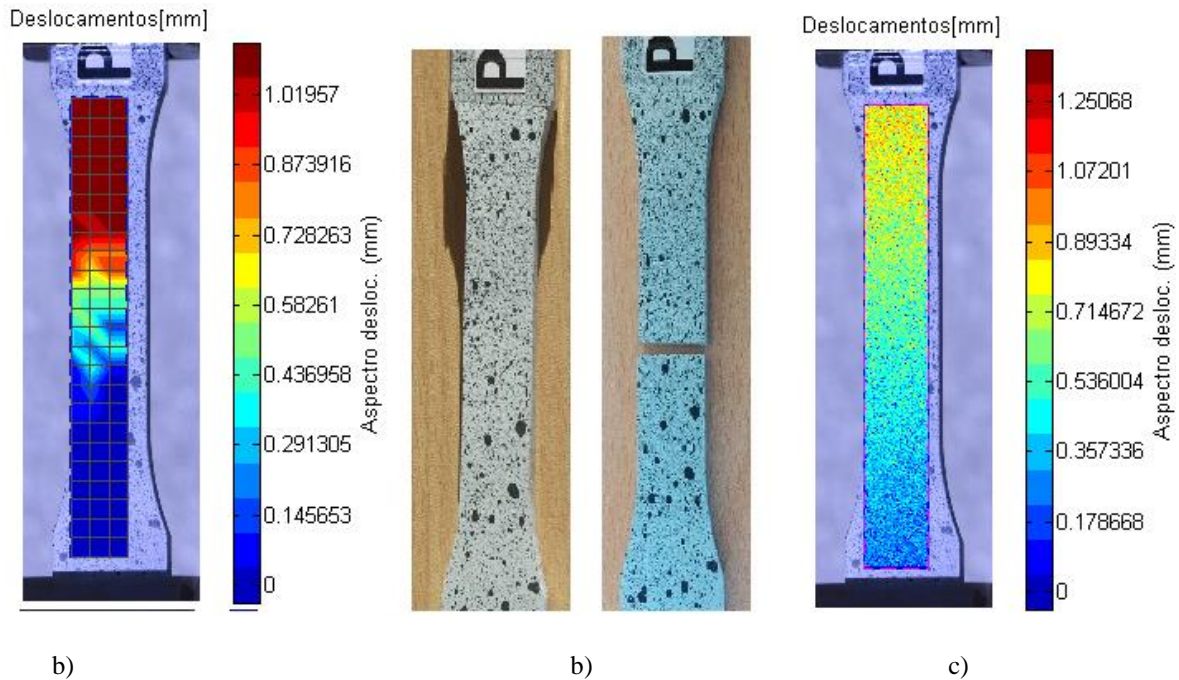


Figura 5.7 – a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostras antes e apos ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.

5.1.1.3 Ensaio 3 – Ensaio realizado com provete de PVC

Através da tabela seguinte pretende-se apresentar as condições resumidas do ensaio físico assim como dos parâmetros característicos respetivos a cada algoritmo definidos na ferramenta elaborada, com vista a comparar a performance de ambos.

TIPO DE ENSAIO	TRAÇÃO		
MATERIAL	PVC		
EQUIPAMENTO DE ENSAIO	MÁQUINA DE ENSAIO DO LABORATORIO DE MECANICA EXPERIMENTAL		
	ALGORITMO ARPS		ALGORITMO HS
TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL	TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL
TAMANHO DO BLOCO	50	ITERAÇÕES	100
P	7	ALFA	1

Tabela 5.5 - Tabela com indicação de carctísticas resumidas do ensaio.

Com base nos parâmetros característicos seleccionados para cada algoritmo, foi possível obter o seguinte deslocamento acumulado:

	DESLOCAMENTO PARCIAL ENTRE IMAGENS CONSECUTIVAS			DESLOCAMENTO ACUMULADO		
	DESLOCAMENTO FISICO	DESL. POR PROC. DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)	DESLOCAMENTO FISICO	DESL. POR PROC DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)
IMAGEM REF ^a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 2	0.270	0.318	0.168	0.270	0.318	0.168
IMAGEM 3	0.270	0.360	0.188	0.540	0.678	0.356
IMAGEM 4	0.340	0.346	0.166	0.880	1.024	0.522
IMAGEM 5	0.420	0.387	0.183	1.300	1.411	0.705
IMAGEM 6	0.420	0.387	0.202	1.720	1.798	0.906
IMAGEM 7	0.340	0.387	0.202	2.060	2.186	1.109
IMAGEM 8	0.570	0.401	0.212	2.630	2.587	1.321
IMAGEM 9	0.340	0.401	0.193	2.970	2.988	1.514
IMAGEM 10	0.420	0.401	0.210	3.390	3.389	1.724
IMAGEM 11	0.420	0.401	0.197	3.810	3.790	1.922
IMAGEM 12	0.340	0.415	0.199	4.150	4.205	2.120
IMAGEM 13	0.570	0.401	0.205	4.720	4.606	2.325
IMAGEM 14	0.340	0.415	0.192	5.060	5.021	2.517
IMAGEM 15	0.420	0.401	0.203	5.480	5.422	2.720
IMAGEM 16	0.420	0.415	0.201	5.900	5.837	2.921
IMAGEM 17	0.340	0.415	0.197	6.240	6.252	3.119
IMAGEM 18	0.570	0.415	0.218	6.810	6.667	3.336
IMAGEM 19	0.340	0.415	0.193	7.150	7.082	3.529
IMAGEM 20	0.420	0.415	0.191	7.570	7.497	3.720
IMAGEM 21	0.420	0.415	0.169	7.990	7.912	3.889
IMAGEM 22	0.340	0.360	0.175	8.330	8.272	4.064
IMAGEM 23	0.570	0.415	0.160	8.900	8.687	4.224

a)

ERRO ABSOLUTO VALOR ACUMULADO		
ALGORITMO	%	mm
ARPS	3.13	0.307
HS	53.19	5.218

b)

Tabela 5.6 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio fisico e por processamento de imagem; b) Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.

Pode-se claramente concluir novamente, através da análise da tabela anterior, que o algoritmo ARPS apresenta uma boa performance quando comparado com o HS. Para pequenos deslocamentos, o algoritmo HS apresenta uma diminuição do erro absoluto acumulado, sendo que neste caso devido a uma maior amplitude dos deslocamentos entre imagens, o erro aumenta significativamente.

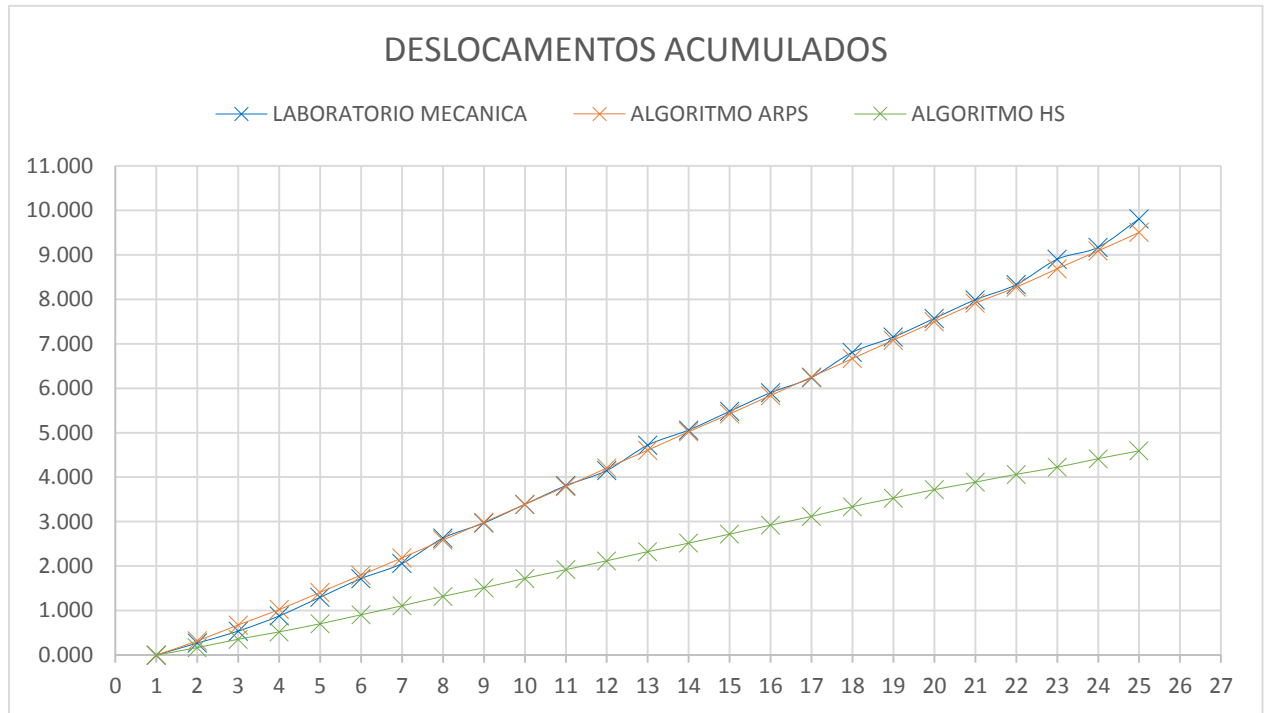


Figura 5.8 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.

Neste ensaio, o provete não apresentou ruptura devido às características elásticas do material, tendo o ensaio sido parado antes do ponto de ruptura.

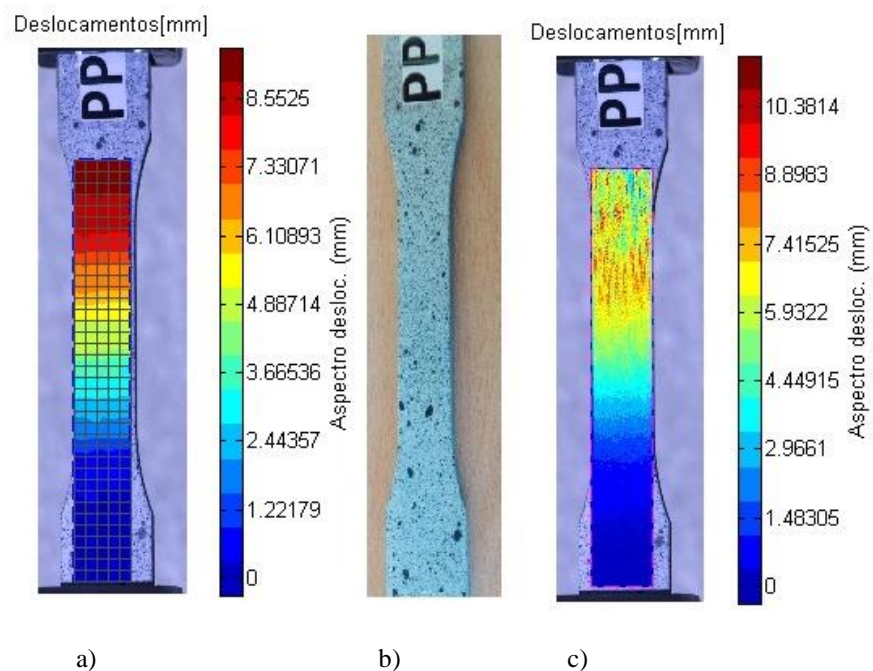


Figura 5.9 – a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostra após ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS

Pode-se verificar que o algoritmo ARPS na extremidade superior apresenta um deslocamento homogéneo e de acordo com o valor registado no sensor da máquina de ensaio. O movimento detetado pelo algoritmo HS é, para determinados deslocamentos, inferior ao deslocamento físico medido.

5.1.2 Ensaio de compressão/flexão realizado

Por impossibilidade de utilização da máquina instalada no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica, para a realização deste tipo de ensaios, foram utilizados dados gentilmente cedidos pela orientadora, dados esses reais e obtidos no decorrer dos ensaios realizados na Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL, no departamento de Engenharia Civil.

5.1.2.1 Ensaio 4 – Ensaio realizado com provete de acrílico

Não se conhecem as características do ensaio, contrariamente aos três ensaios anteriormente apresentados, no entanto conhece-se o provete, o respetivo padrão aleatório e os valores físicos registados através de um LVDT, passando a apresentar-se de seguida:

- Padrão do provete do ensaio 4 (provetes de polímero)

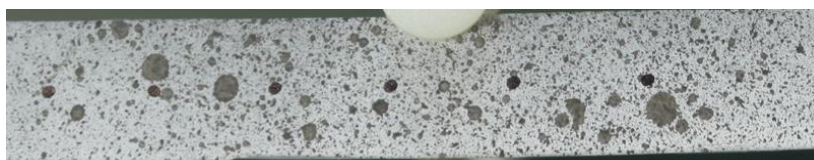


Figura 5.10 – Provetes ensaio 4.

Através da tabela seguinte pretende-se apresentar as condições resumidas do ensaio físico assim como dos parâmetros característicos respetivos a cada algoritmo definidos na ferramenta elaborada, com vista a comparar a performance de ambos.

TIPO DE ENSAIO	FLEXÃO		
MATERIAL	ACRILICO		
EQUIPAMENTO DE ENSAIO	MÁQUINA DE ENSAIO DO LABORATORIO DE ENGENHARIA CIVIL DA FCT-UNL		
	ALGORITMO ARPS	ALGORITMO HS	
TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL	TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL
TAMANHO DO BLOCO	75	ITERAÇÕES	100
P	7	ALFA	1

Tabela 5.7 - Tabela com indicação de características resumidas do ensaio.

Com base nos parâmetros característicos selecionados para cada algoritmo, foi possível obter o deslocamento acumulado apresentado na tabela 5.8:

	DESLOCAMENTO PARCIAL ENTRE IMAGENS CONSECUTIVAS			DESLOCAMENTO ACUMULADO		
	DESLOCAMENTO FISICO	DESL. POR PROC. DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)	DESLOCAMNTO FISICO	DESL. POR PROC DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)
IMAGEM REF ^a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 2	0.115	0.243	0.033	0.115	0.243	0.033
IMAGEM 3	0.115	0.174	0.073	0.230	0.417	0.106
IMAGEM 4	0.288	0.104	0.100	0.518	0.522	0.206
IMAGEM 5	0.192	0.139	0.090	0.710	0.661	0.296
IMAGEM 6	0.298	0.243	0.033	1.008	0.904	0.329
IMAGEM 7	0.182	0.209	0.062	1.190	1.113	0.391
IMAGEM 8	0.259	0.232	0.038	1.450	1.345	0.430
IMAGEM 9	0.115	0.209	0.060	1.565	1.554	0.490
IMAGEM 10	0.192	0.243	0.046	1.757	1.797	0.536
IMAGEM 11	0.125	0.035	0.047	1.882	1.832	0.584
IMAGEM 12	0.365	0.243	0.053	2.246	2.075	0.636
IMAGEM 13	0.086	0.243	0.042	2.333	2.319	0.679
IMAGEM 14	0.326	0.174	0.074	2.659	2.493	0.753
IMAGEM 15	0.067	0.243	0.051	2.726	2.736	0.804
IMAGEM 16	0.058	0.139	0.088	2.784	2.875	0.892
IMAGEM 17	0.317	0.035	0.040	3.101	2.910	0.932
IMAGEM 18	0.163	0.243	0.035	3.264	3.154	0.967
IMAGEM 19	0.096	0.116	0.087	3.360	3.270	1.054
IMAGEM 20	0.058	0.174	0.061	3.418	3.443	1.115
IMAGEM 21	0.144	0.041	0.043	3.562	3.485	1.159
IMAGEM 22	0.106	0.144	0.073	3.667	3.629	1.232

a)

ERRO ABSOLUTO VALOR ACUMULADO		
ALGORITMO	%	mm
ARPS	1.04	0.038
HS	66.40	2.435

b)

Tabela 5.8 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio físico e por processamento de imagem; b) Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.

Pode-se claramente concluir que, também para este tipo de ensaio, o algoritmo ARPS apresenta uma boa performance quando comparado com o HS. O erro relativo ao deslocamento total acumulado do algoritmo ARPS quando comparado com o registo físico é ligeiramente superior a 1%, valor esse bastante aceitável tendo em conta o deslocamento acumulado de 3.667 mm registado.

Através do gráfico da figura 5.11, pode-se observar efetivamente a evolução de ambos os algoritmos onde se constata a precisão do ARPS e os desvios significativos obtidos com o HS.

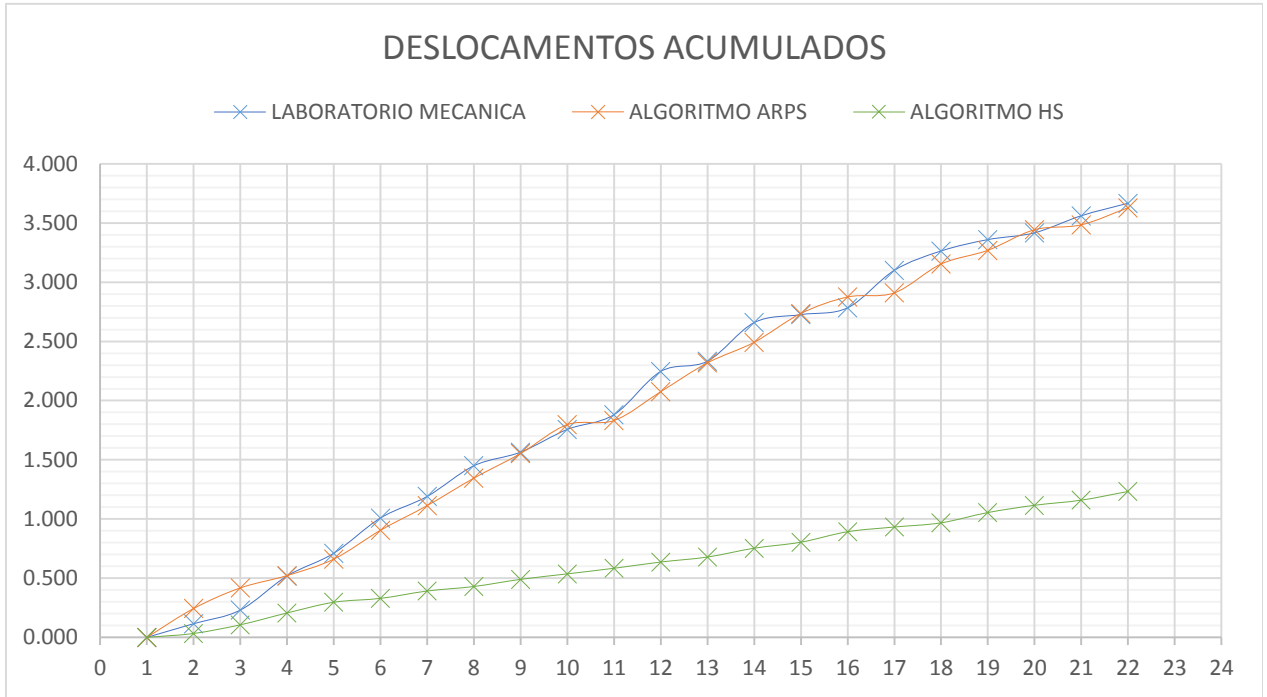


Figura 5.11 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.

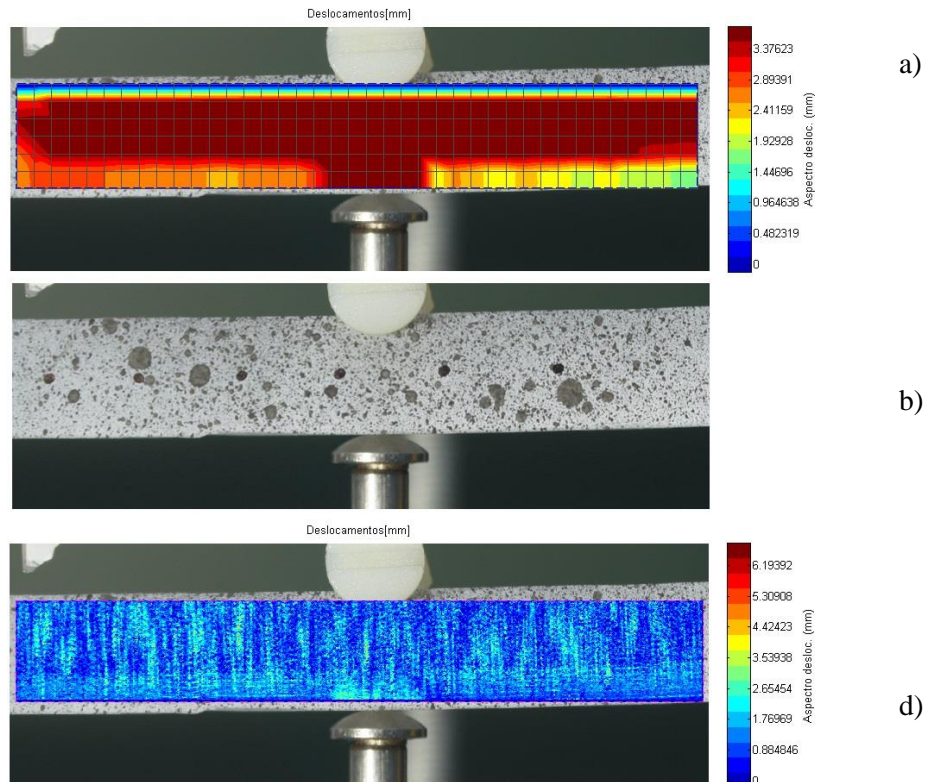


Figura 5.12 – a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostra ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.

Para o nível de amplitude de deslocamento parcial entre cada imagem, o algoritmo HS não se mostrou robusto de modo a detetar o movimento físico do provete. Já o ARPS apresentou um erro sobre o valor acumulado somente de cerca de 1%, para deslocamento total de 3.667 mm, o que se pode considerar aceitável tendo em conta as variáveis envolvidas, como variação do brilho, padrão aleatório, fixação nos suportes, etc...

5.1.3 Ensaio teórico com deslocamentos verticais e horizontais

Tendo-se registado desvios significativos dos valores de deslocamento obtidos com o algoritmo HS, foi realizado este ensaio teórico para se perceber qual a relação do erro com a amplitude ou tipo de deslocamento a calcular, uma vez que nos ensaios anteriores só foi possível perceber de forma qualitativa que a amplitude influenciava o erro no algoritmo HS, quanto maior a amplitude do movimento maior o erro absoluto calculado. Tinha interesse no âmbito deste estudo, realizar este ensaio controlado por forma a aferir os resultados obtidos assim como perceber possíveis limitações dos algoritmos.

5.1.3.1 Ensaio 5 – Deslocamento *pixel a pixel* gerado em Matlab

Através da tabela seguinte pretende-se apresentar as condições resumidas do ensaio teórico assim como dos parâmetros característicos respetivos a cada algoritmo definidos na ferramenta elaborada, com vista a comparar a performance de ambos.

TIPO DE ENSAIO	**		
MATERIAL	ACRILICO		
EQUIPAMENTO DE ENSAIO	ENSAIO TEORICO COM RECURSO AO MATLAB		
ALGORITMO ARPS	ALGORITMO HS		
TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL	TIPO DESLOCAMENTO	VERTICAL
TAMANHO DO BLOCO	50	ITERAÇÕES	100
P	7	ALFA	1

Tabela 5.9 - Tabela com indicação de características resumidas do ensaio.

O ensaio teve resumidamente como base a geração de 25 imagens a partir de uma referência, tendo sido induzido um deslocamento de “n” pixels na vertical e horizontal (perfazendo um deslocamento acumulado de 1 mm em cada direção). A essa sequência de imagem foi aplicado o algoritmo ARPS e o HS para a determinação do deslocamento acumulado baseado em técnicas de processamento de imagem.

Com base nos parâmetros característicos selecionados para cada algoritmo, foi possível obter o seguinte deslocamento parciais:

	DESL. EM PIXEIS	DESLOCAMENTO VERTICAL			DESLOCAMENTO HORIZONTAL		
		DESL. FISICO TEORICO	DESL. POR PROC. DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)	DESL. FISICO TEORICO	DESL. POR PROC. DE IMAGEM (ARPS)	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS)
IMAGEM REF ^a	0 V ----- 0 H	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 2	1 V ----- 0 H	0.036	0.036	0.034	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 3	1 V ----- 0 H	0.036	0.036	0.034	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 4	1 V ----- 0 H	0.036	0.036	0.035	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 5	1 V ----- 0 H	0.036	0.036	0.035	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 6	2 V ----- 0 H	0.071	0.072	0.076	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 7	2 V ----- 0 H	0.071	0.072	0.076	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 8	2 V ----- 0 H	0.071	0.072	0.076	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 9	2 V ----- 0 H	0.071	0.072	0.076	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 10	3 V ----- 0 H	0.107	0.108	0.068	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 11	3 V ----- 0 H	0.107	0.108	0.068	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 12	5 V ----- 0 H	0.179	0.180	0.019	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 13	5 V ----- 0 H	0.179	0.180	0.020	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 14	0 V ----- 1 H	0.000	0.000	0.000	0.036	0.036	0.035
IMAGEM 15	0 V ----- 1 H	0.000	0.000	0.000	0.036	0.036	0.035
IMAGEM 16	0 V ----- 1 H	0.000	0.000	0.000	0.036	0.036	0.035
IMAGEM 17	0 V ----- 1 H	0.000	0.000	0.000	0.036	0.036	0.035
IMAGEM 18	0 V ----- 2 H	0.000	0.000	0.000	0.071	0.072	0.074
IMAGEM 19	0 V ----- 2 H	0.000	0.000	0.000	0.071	0.072	0.073
IMAGEM 20	0 V ----- 2 H	0.000	0.000	0.000	0.071	0.072	0.073
IMAGEM 21	0 V ----- 2 H	0.000	0.000	0.000	0.071	0.072	0.073
IMAGEM 22	0 V ----- 3 H	0.000	0.000	0.000	0.107	0.108	0.052
IMAGEM 23	0 V ----- 3 H	0.000	0.000	0.000	0.107	0.108	0.052
IMAGEM 24	0 V ----- 5 H	0.000	0.000	0.000	0.179	0.180	0.014
IMAGEM 25	0 V ----- 5 H	0.000	0.000	0.000	0.179	0.180	0.013

Tabela 5.10 – Tabela de deslocamentos parciais.

A análise da tabela anterior permite obter com clareza a relação da amplitude do deslocamento com o erro. Para deslocamentos maiores ou iguais a três pixéis, o algoritmo HS apresenta um baixa performance e fiabilidade, sendo pouco preciso nesses casos. Para deslocamentos inferiores a três pixéis o erro é relativamente baixo.

O ARPS demonstra boa performance independentemente da amplitude do deslocamento. Os testes realizados tiveram um amplitude máxima de 5 pixéis, valor esse para o qual este algoritmo mostrou-se robusto.

	DESLOCAMENTO ACUMULADO					
	DESL. FISICO TEORICO VERTICAL	DESL. FISICO TEORICO HORIZONTAL	DESL. POR PROC DE IMAGEM (ARPS) VERTICAL	DESL. POR PROC DE IMAGEM (ARPS) HORIZONTAL	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS) VERTICAL	DESL. POR PROC DE IMAGEM (HS) HORIZONTAL
IMAGEM REF ^a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IMAGEM 2	0.036	0.000	0.036	0.000	0.034	0.000
IMAGEM 3	0.071	0.000	0.072	0.000	0.069	0.000
IMAGEM 4	0.107	0.000	0.108	0.000	0.104	0.000
IMAGEM 5	0.143	0.000	0.144	0.000	0.138	0.000
IMAGEM 6	0.214	0.000	0.215	0.000	0.214	0.000
IMAGEM 7	0.286	0.000	0.287	0.000	0.290	0.000
IMAGEM 8	0.357	0.000	0.359	0.000	0.366	0.000
IMAGEM 9	0.429	0.000	0.431	0.000	0.442	0.000
IMAGEM 10	0.536	0.000	0.539	0.000	0.510	0.000
IMAGEM 11	0.643	0.000	0.646	0.000	0.577	0.000
IMAGEM 12	0.821	0.000	0.826	0.000	0.597	0.000
IMAGEM 13	1.000	0.000	1.006	0.000	0.616	0.000
IMAGEM 14	1.000	0.000	1.006	0.000	0.616	0.000
IMAGEM 15	1.000	0.071	1.006	0.072	0.616	0.070
IMAGEM 16	1.000	0.107	1.006	0.108	0.616	0.105
IMAGEM 17	1.000	0.143	1.006	0.144	0.616	0.140
IMAGEM 18	1.000	0.214	1.006	0.215	0.616	0.214
IMAGEM 19	1.000	0.286	1.006	0.287	0.616	0.287
IMAGEM 20	1.000	0.357	1.006	0.359	0.616	0.360
IMAGEM 21	1.000	0.429	1.006	0.431	0.616	0.433
IMAGEM 22	1.000	0.536	1.006	0.539	0.616	0.485
IMAGEM 23	1.000	0.643	1.006	0.646	0.616	0.537
IMAGEM 24	1.000	0.821	1.006	0.826	0.616	0.551
IMAGEM 25	1.000	1.000	1.006	1.006	0.616	0.564

a)

ALGORITMO	ERRO ABSOLUTO VALOR ACUMULADO			
	VERTICAL		HORIZONTAL	
	%	mm	%	mm
ARPS	0.56	0.006	0.56	0.006
HS	38.38	0.384	43.57	0.436

b)

Tabela 5.11 – a) Tabela de deslocamentos acumulados do ensaio fisico teorico e por processamento de imagem; b) Tabela de erro relativa ao deslocamento total acumulado.

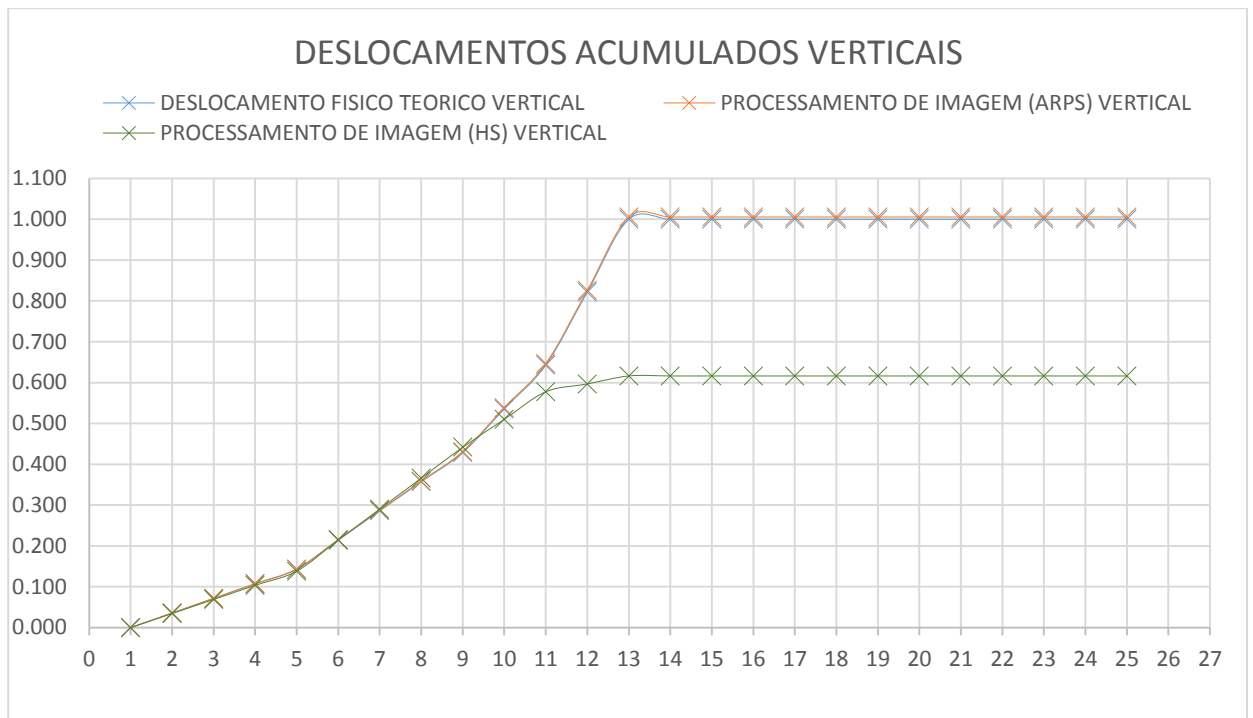


Figura 5.13 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.

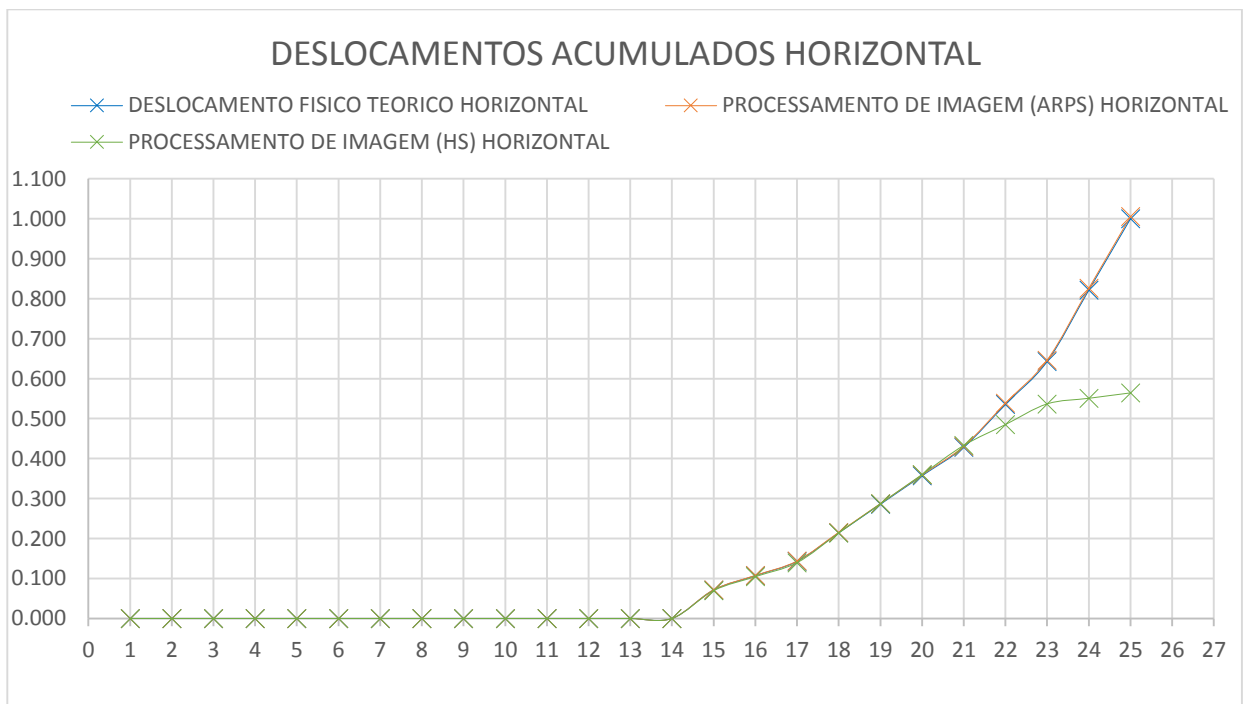


Figura 5.14 – Gráfico de deslocamentos acumulados físicos e por processamento de imagem.

Com base nos valores de deslocamento da tabela, assim como com a observação da evolução dos deslocamentos através dos gráficos (figura 5.13 e 5.14), podemos verificar com clareza que o algoritmo ARPS apresenta boa performance, independentemente das variações da amplitude do deslocamento. O Algoritmo HS apresenta precisão na detecção de deslocamentos parciais até dois pixels. Acima de dois pixels, o valor do deslocamento registado através de processamento de imagem

em comparação com o deslocamento físico apresenta desvios que são tanto maiores quanto maior for a amplitude real do movimento. O tipo de deslocamento (horizontal ou vertical) não tem qualquer influência no cálculo dos valores, são ambos detetados.

Relativamente à figura 5.15 que contém os deslocamentos parciais acumulados, podemos ver uma uniformidade no caso do algoritmo ARPS. Os blocos apresentam uma coloração homogénea e de valor equivalente ao deslocamento acumulado. No caso do HS está muito segmentado.

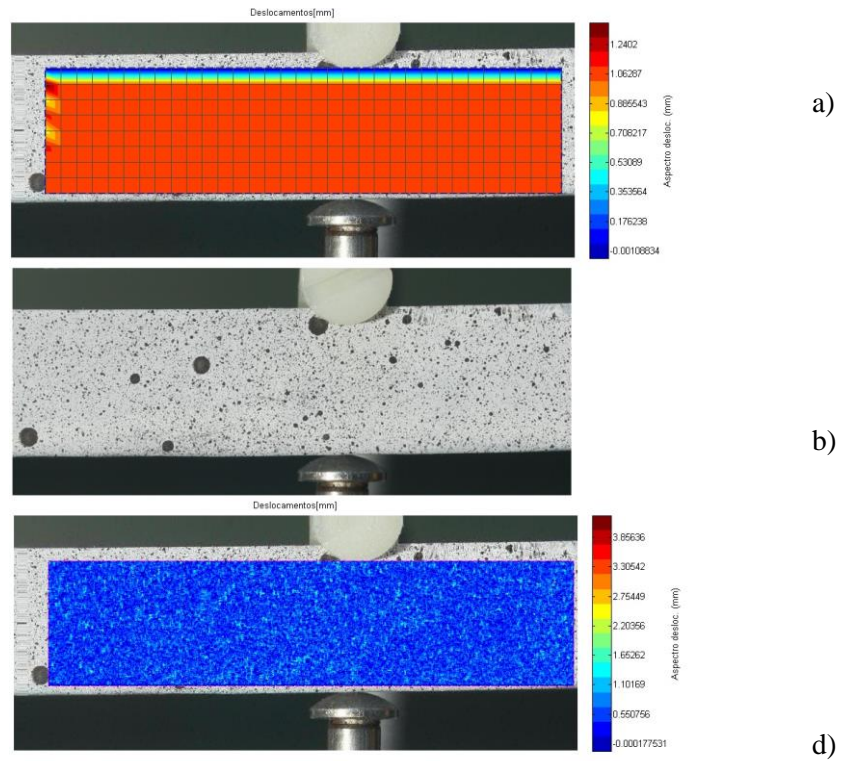


Figura 5.15 – Deslocamento vertical a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostra ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.

Mais uma vez podemos constatar que o tipo de deslocamento não afeta o resultado final do deslocamento calculado, e que as conclusões são idênticas às tidas para o deslocamento vertical.

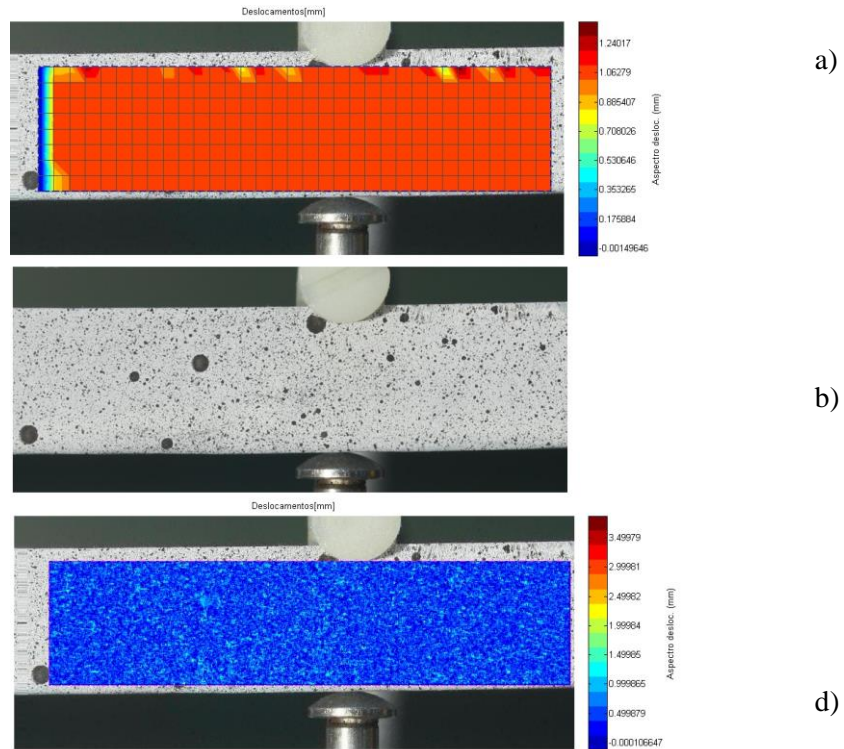


Figura 5.16 – Deslocamento horizontal a) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo ARPS; b) amostra ensaio; c) Espectro de deslocamento acumulado da imagem com algoritmo HS.

Deste modo conclui-se que o algoritmo HS apresenta precisão até dois pixéis, pelo que poderá ser utilizado nesses casos. Acima desse valor de deslocamento, só o ARPS se mostrou fiável e preciso.

6

Conclusões e investigação futura

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o estudo realizado, assim como propostas de estudo e desenvolvimento futuro

6.1 Conclusão e investigação futura

6.1.1 Conclusão

Com base neste estudo teórico e nos ensaios práticos realizados, o Algoritmo ARPS demonstra grande precisão para um alcance de deslocamento bastante alargado. O algoritmo HS poderá ser usado em ensaios em que o deslocamento seja reduzido (inferior ou igual a dois pixéis).

Podemos desde já concluir que para materiais com propriedades elásticas (exemplo de um polímero como PVC), uma pequena força poderá dar origem a grandes deslocamentos. Nestes casos, o algoritmo HS não é adequado, sendo o ARPS a solução mais viável. No caso do estudo de materiais com elevada dureza, ou seja que tenham propriedades predominantemente inelásticos, tenderão a aguentar grandes forças com pequenos deslocamentos até atingirem o ponto de rotura. Nestes casos, ambos os algoritmos poderão apresentar a precisão de medida necessária.

Nos cinco ensaios realizados, o algoritmo ARPS apresentou sempre um erro inferior a 6% do deslocamento total acumulado independentemente da característica do movimento, quando comparado com os dados recolhidos através do método tradicional. No caso do algoritmo HS, este apresentou um erro sempre superior a 30% e, no ensaio em que os deslocamentos parciais apresentam maior amplitude, o erro é cerca de 70%, quando comparado com os deslocamentos físicos.

Nos ensaios em que se apresenta um padrão contendo objetos de maior dimensão (ensaio dois e ensaio quatro), o tamanho do bloco no algoritmo ARPS demonstrou ter influência nos resultados. O bloco deverá ser sempre superior ao tamanho do maior objeto para que o algoritmo consiga distinguir os blocos em cada comparação, ou seja não haja mais que uma correspondência de blocos entre duas imagens. O parâmetro p (relativo ao alcance) torna-se importante por forma a detetar toda a gama de deslocamentos sendo este parâmetro importante em materiais com características elásticas. Se este parâmetro for inferior ao deslocamento do *pixel*, o erro será elevado.

No caso do algoritmo HS, as alterações dos parâmetros característicos para deslocamentos superiores a dois pixéis não melhoram a deteção do movimento significativamente.

Relativamente à rapidez de cálculo e necessidade de processamento, o Algoritmo ARPS apresenta melhor performance face ao HS (teste realizado para uma determinada região obteve-se 2,4 segundos para o ARPS e 17 segundos de processamento para o HS), esta característica deve-se ao facto do primeiro algoritmo fazer a procura com base em um bloco, contrariamente ao HS que faz uma procura exaustiva (*pixel a pixel*), não tendo qualquer vantagem do ponto de vista do valor final de deslocamento calculado. Poder-se-ia alterar o código para, em vez de realizar o processamento de todos os pixéis, fazer uma análise *pixel a pixel* mas espaçado de um determinado conjunto de pixéis.

Poderia melhorar a capacidade de processamento, mas para pequenos deslocamentos mas, poder-se-ia perder pormenores importantes que traduzissem o movimento físico do objeto.

A interface criada, apresenta-se aqui como uma alternativa aos métodos tradicionais de medição de deslocamentos. Neste caso foram implementados dois algoritmos distintos, podendo ser estendido a quantos mais se pretenderem, uma vez que se terá somente que se adicionar as janelas e rotinas necessárias ao cálculo de cada algoritmo específico. A interface tem vantagem de se poder comparar numericamente vários ensaios (atualmente implementado três, o do meio físico carregado inicialmente com as imagens, o realizado por processamento de imagem e um externo (através de processamento de imagem ou não) que serão importado de um ficheiro de dados previamente guardado, gerando tabelas de valores parciais e acumulados, medidas de erro usadas assim como gráficos de valores, erros, espectros de cor de movimento entre outros. A ferramenta permite, através de programação, adicionar outros gráficos que sejam de interesse ao estudo, assim como exportar os dados processados para comparações futuras ou para serem trabalhados em outros programas.

Relativamente ao processamento de imagem para medição de deslocamentos, independentemente de ser com este ou outra interface, parece claro as vantagens, recorrendo para isso à análise das figuras em que foram apresentados os mapas do deslocamento acumulado. Pode-se perfeitamente concluir que regiões diferentes podem apresentar deslocamentos diferentes, assim como os pontos de rotura nem sempre ocorrem onde se prevê. Para além disso, pode-se visualizar os possíveis pontos de rotura uma vez que se vai construindo um mapa de valores acumulados imagem a imagem.

Através de métodos tradicionais, além destes poderem ser invasivos e poderem alterar o resultado final do ensaio (devido ao contacto ou resinas de fixação), não há garantia que a sua instalação foi efetuada precisamente na região na qual irá surgir a rotura ou um outro evento que se pretende medir. Ao utilizar o processamento de imagem, independentemente do fenómeno que ocorra, teremos sempre registado o comportamento de todo o objeto que se encontra ao alcance da lente, podendo ser estudado à posterior o comportamento de uma nova região de interesse.

6.1.2 Investigação futura

Através da análise dos resultados pode-se facilmente concluir que poderá ser interessante procurar uma alternativa ao algoritmo HS que apresente a mesma ou melhor performance que eventualmente o ARPS. Poder-se-ia, em alternativa, no caso do HS usar-se para o processamento, não a totalidade dos pontos (pixéis), mas sim pontos espaçados entre si, garantindo um menor tempo de processamento e um menor consumo de recursos.

Outro fator também importante será, implementar um algoritmo que permita fazer uma pré-análise ao perfil e amplitude do deslocamento e, com base nesse processamento calcular automaticamente os parâmetros característicos relativos a cada algoritmo. Este fator pode ser importante

particularmente quando o equipamento de ensaio não possua qualquer tipo de detetor de deslocamento da haste, ou o utilizador não tenha sensibilidade que lhe permita fazer uma pré-análise dos dados para determinar a amplitude esperada do movimento.

O estudo do deslocamento através de processamento de imagem poderá ser aprofundado nos campos da segurança de estruturas, existindo já alguns estudos para pontes, poderá ser também usado para deteção de objetos estranhos sobre a via pública ou linhas férreas, deteção de derrocadas, etc..., bastando para isso camaras de alta definição de longo alcance e de um algoritmo automático de análise baseado no conceito desenvolvido.

Bibliografia

Referências bibliográficas consultadas para suportar a base teórica da presente dissertação.

A bibliografia está organizada com base na norma adotada pelo IEEE. Está definida de forma automática com recurso ao *software* Mendeley. Existe no entanto algumas referências editadas manualmente por imposição do autor.

- [1] A. D. C. Nicolás Carnizello Accarini, Wânderson de Oliveira Assis, “DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CAPTURA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS PARA ROBÔS AUTÔNOMOS,” *Area*, vol. 2, no. 1, pp. 103– 116, 2009.
- [2] S. N. F. de Oliveira, “Técnicas de Processamento de Imagem Aplicadas a Problemas de Automação Industrial Engenharia Mecânica Júri,” 2009.
- [3] F. Melício, “Automação e Robótica Industrial.” 2008.
- [4] A. Garcia, J. A. Spim, and C. A. Dos Santos, “Ensaaios dos materiais,” p. 247, 2007.
- [5] J. F. O. Santos, *Ensaaios Destrutivos*. 2000.
- [6] B. Mac, “Digital image processing.” [Online]. Available: <http://www.comp.dit.ie/bmacnamee/index.htm>.
- [7] J. Valença, “Reabilitação e Reforço de Estruturas.” (IST/UTL), 2012.
- [8] Scott E Umbaugh, *Digital image processing and computer vision*, vol. 8, no. 3. 1990.
- [9] R. C. Gonzalez, *Digital Image Processing*, 3rd ed. Pearson Education, Inc., 2008.
- [10] J. Silva and V. Tavares, “Conversores Analógico / Digital e Digital / Analógico.” 2005.
- [11] P. Aksoy and L. DeNardis, *Information Technology in Theory*. Cengage Learning, 2007.
- [12] M. T. Coimbra, “Capítulo III – Processamento de Imagem,” *Universidade do Porto*. [Online]. Available: https://www.dcc.fc.up.pt/~mcoimbra/lectures/PSI_1011/Aula 4 - Capitulo III.pdf.
- [13] M. V. Cavinato, “Projecto 01A-Realce de imagens utilizando transformação de intensidades,” 2009.
- [14] A. W. and E. W. R. Fisher, S. Perkins, “Contrast Stretching,” *The University of Edinburgh-School of Informatics*, 2003. [Online]. Available: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/stretch.htm>.
- [15] M. Nixon and A. Aguado, *Feature extraction & image processing*. 2008.
- [16] C. Kanan and G. W. Cottrell, “Color-to-grayscale: Does the method matter in image recognition?,” *PLoS One*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2012.
- [17] C. Saravanan, “Color Image to Grayscale Image Conversion,” in *2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications*, 2010, vol. 2, pp. 196–199.
- [18] B. S. Mehmet Sezgin, “Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation,” *J. Electron. Imaging*, vol. 13, no. 1, p. 220, 2004.
- [19] “Teoria : Processamento de Imagens,” *SPRING - DPI/INPE*. [Online]. Available: <http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/filtrage/filtragem.htm>.
- [20] F. L. Eduardo Azevedo, “Computação gráfica,” 2009. [Online]. Available: <http://computacaografica.ic.uff.br/transparenciasvol2cap5.pdf>.
- [21] N. Patel, A. Shah, M. Mistry, and K. Dangarwala, “A Study of Digital Image Filtering Techniques in Spatial Image Processing,” pp. 1–7, 2014.
- [22] J. Van de Weijer and R. Van den Boomgaard, “Local mode filtering,” *Proc. 2001 IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition. CVPR 2001*, vol. 2, pp. 2–7, 2001.
- [23] Y. Nie and K.-K. Ma, “Adaptive rood pattern search for fast block-matching motion estimation,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 11, no. 12, pp. 1442–9, Jan. 2002.

- [24] T. I. Ren, "Processamento de Imagem Morfológica," *Univ. Fed. Pernambuco*, p. 60, 2011.
- [25] Jayaraman, *Digital Image Processing*. Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- [26] C. H. Chen, L. F. Pau, and P. S. P. Wang, *Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision*. World Scientific, 1993.
- [27] N.-S. Nguyen, D.-H. Bui, and X.-T. Tran, "Reducing temporal redundancy in MJPEG using Zipfian estimation techniques," in *2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*, 2014, pp. 65–68.
- [28] M. Kaushik, "Comparative Analysis of Exhaustive Search Algorithm with ARPS Algorithm for Motion Estimation," vol. 1, no. 6, pp. 16–19, 2012.
- [29] G. Almeida, "Image Processing for Displacement Measurements," Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [30] A. Barjatya, "Block Matching Algorithms For Motion Estimation," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 8, no. 3, pp. 225–229, 2004.
- [31] S. Metkar and S. Talbar, *Motion Estimation Techniques for Digital Video Coding*. India: Springer India, 2013.
- [32] N. Bauer, P. Pathirana, and P. Hodgson, "Robust Optical Flow with Combined Lucas-Kanade/Horn-Schunck and Automatic Neighborhood Selection," in *2006 International Conference on Information and Automation*, 2006, pp. 378–383.
- [33] M. Bertero, T. A. Poggio, and V. Torre, "Ill-posed problems in early vision," *Proc. IEEE*, vol. 76, no. 8, pp. 869–889, 1988.
- [34] J. L. Barron, D. J. Fleet, S. S. Beauchemin, and T. A. Burkitt, "Performance of optical flow techniques," in *Proceedings 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1992, pp. 236–242.
- [35] J. a/l Kanawathi, S. S. Mokri, N. Ibrahim, A. Hussain, and M. M. Mustafa, "Motion detection using Horn Schunck algorithm and implementation," in *2009 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, 2009, vol. 01, pp. 83–87.
- [36] B. G. S. Berthold K. P. Horn, "Determining Optical Flow."
- [37] D. Cremers, *Statistical and Geometrical Approaches to Visual Motion Analysis*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [38] P. O'Donovan, "Optical Flow: Techniques and Applications," *Int. J. Comput. Vis.*, pp. 1–26, 2005.
- [39] "GUI Building Basics." [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/matlab/gui-building-basics.html>.
- [40] A. Barjatya, "Block Matching Algorithms for Motion Estimation," 2011. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8761-block-matching-algorithms-for-motion-estimation>.
- [41] M. Kharbat, "An implementaion of the very classical optical flow method of Horn & Schunck," 2009. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22756-horn-schunck-optical-flow-method>.
- [42] Brian, "Scientific Calculator," 2012. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32286-scientific-calculator>.
- [43] T. Carvalho, "Espectro Eletromagnético." [Online]. Available: <http://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2007/12/espectro-visivel-da-luz.jpg>. [Accessed: 22-Dec-2015].
- [44] V. Soares, "APS-Aquisição e processamento de sinais," pp. 1–23, 2015.
- [45] W. K. Pratt, *Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside*, 3rd ed. Wiley, 2007.

- [46] “The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing, copyright ©1997-1998 by Steven W. Smith.” [Online]. Available: <http://www.dspguide.com/ch25/4.htm>.

Anexos

Anexos para complemento ao relatório

Anexo 1- Fluxogramas detalhados

- Fluxograma da janela de seleção de dados, calibração de camara, definição da ROI

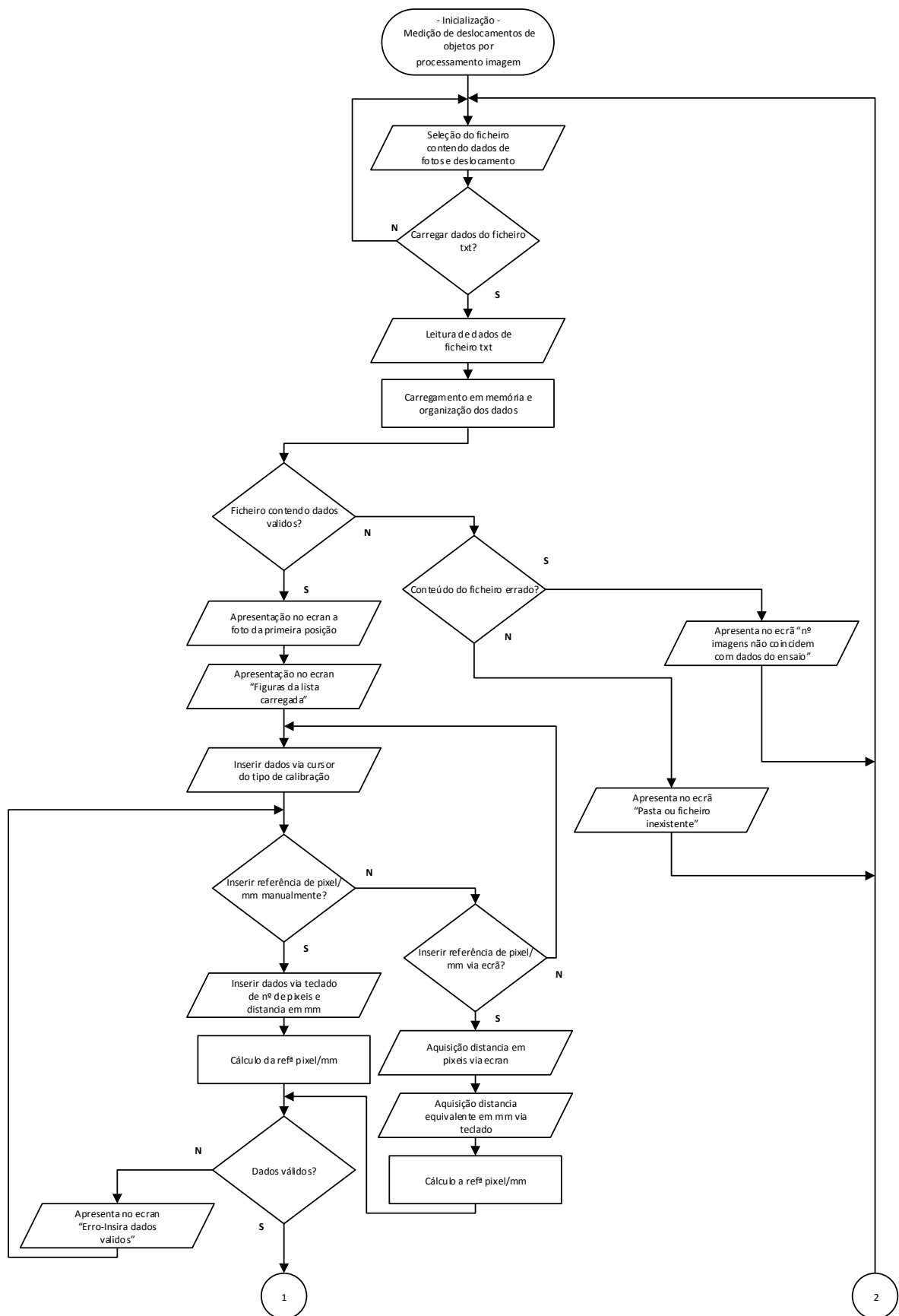


Figura A.1 – Fluxograma da janela de seleção de dados, calibração de camara, definição da ROI

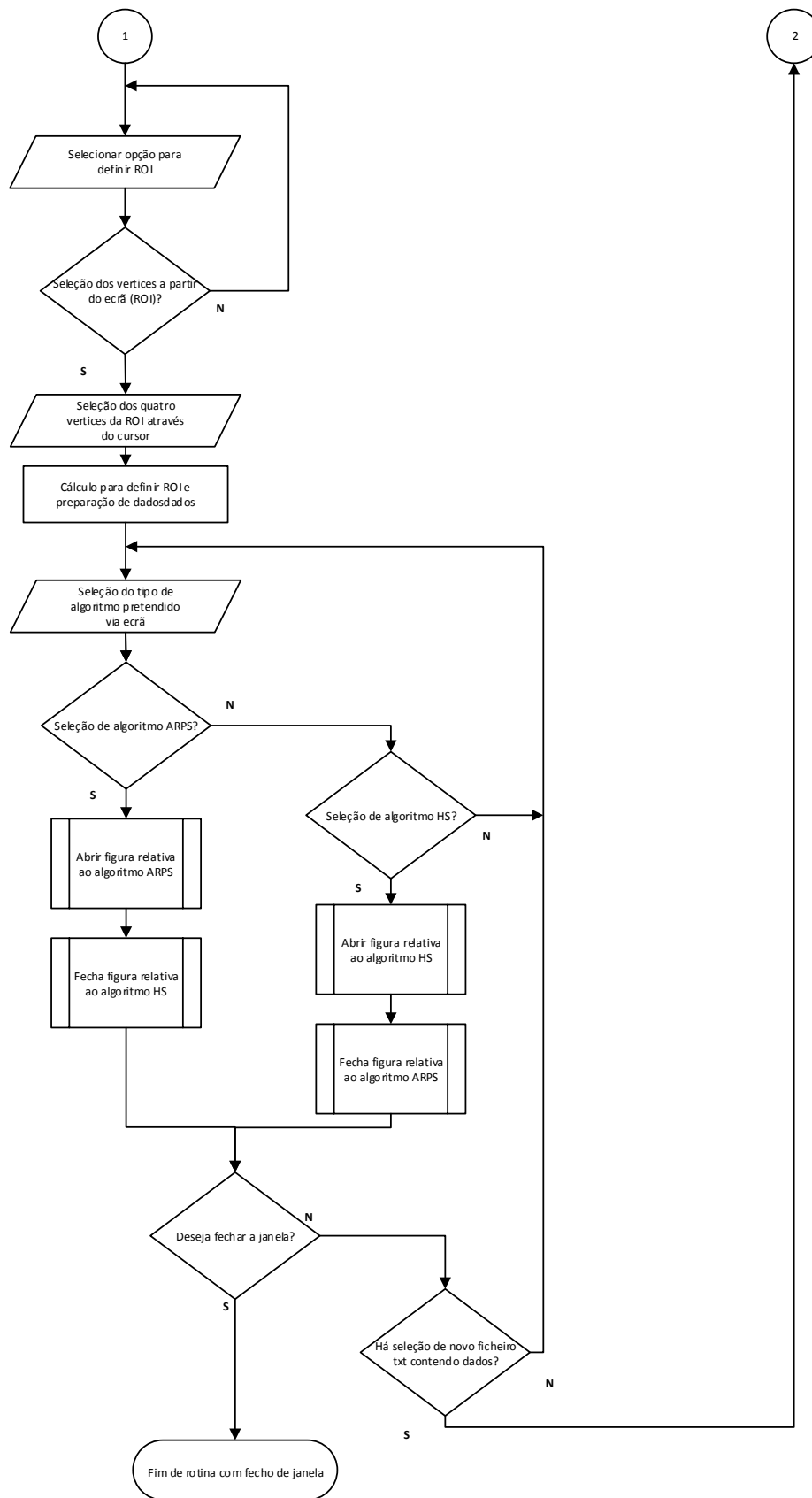


Figura A.2 – Fluxograma da janela de seleção de dados, calibração de camara, definição da ROI (continuação)

○ **Representação gráfica**



a)



b)

Figura A.3 – Aspeto visual da janela de seleção de dados, calibração de camara, definição da ROI - a) Aspeto no arranque – b) Aspeto após preenchimento dos campos obrigatórios

• Fluxograma da janela de especificação do algoritmo ARPS

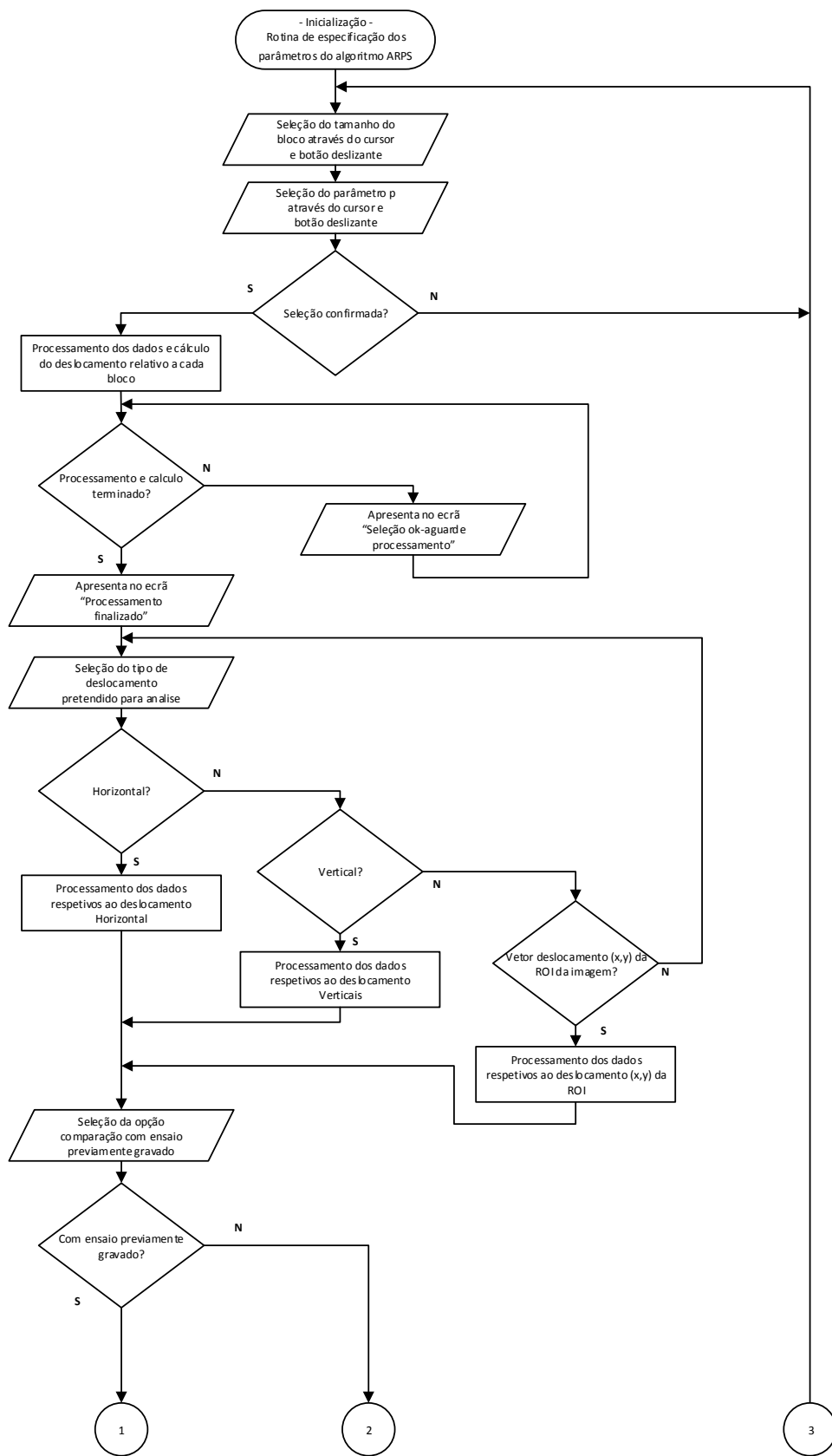


Figura A.4 – Fluxograma da janela de especificação do algoritmo ARPS

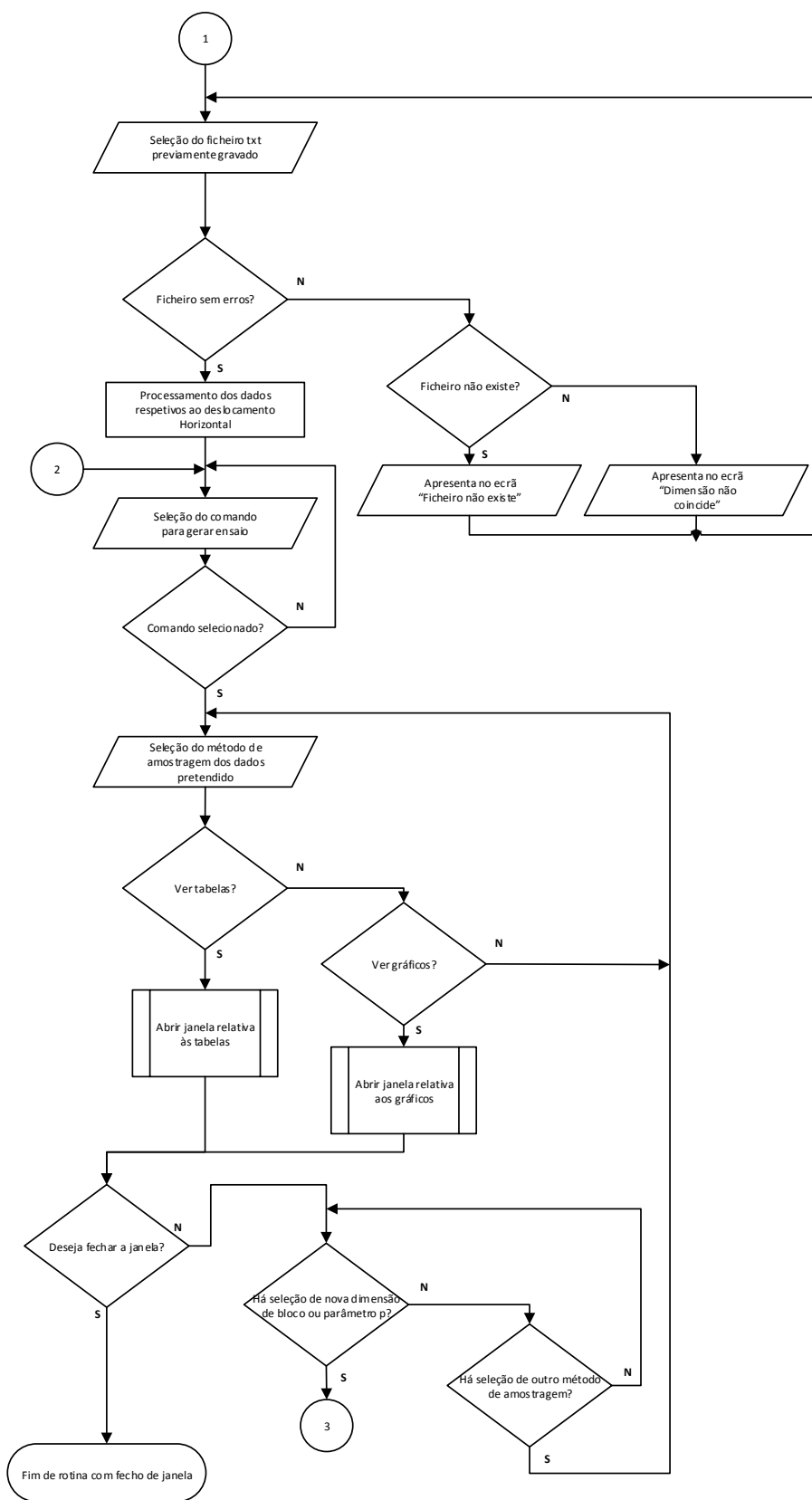
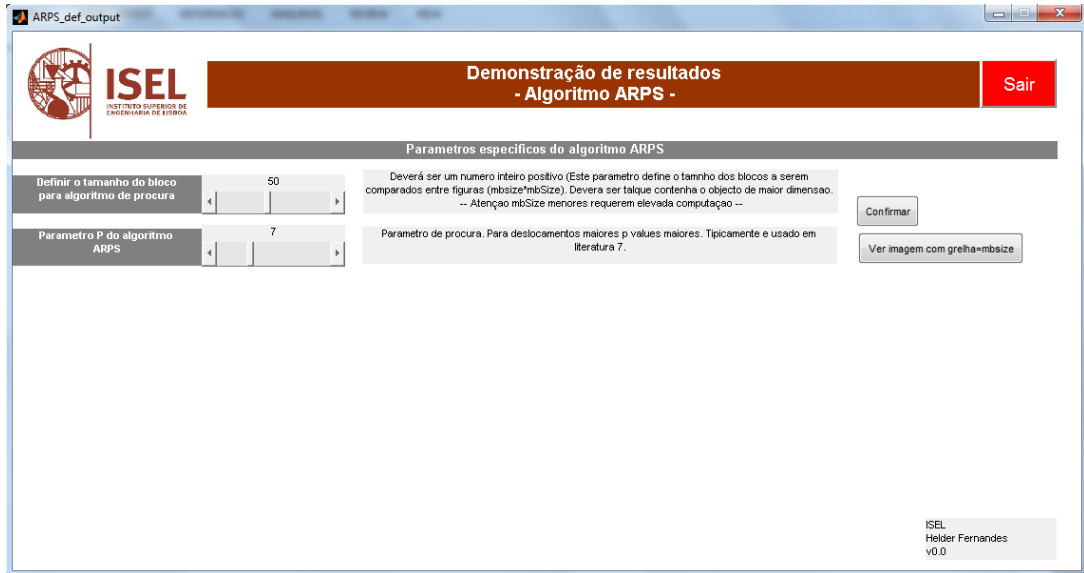


Figura A.5 – Fluxograma da janela de especificação do algoritmo ARPS (continuação)

○ Representação gráfica



a)



b)

Figura A.6 – Aspeto visual da Janela de especificação do algoritmo ARPS- a) Aspeto no arranque – b) Aspeto após preenchimento dos campos obrigatórios

- Fluxograma da janela de especificação do algoritmo HS

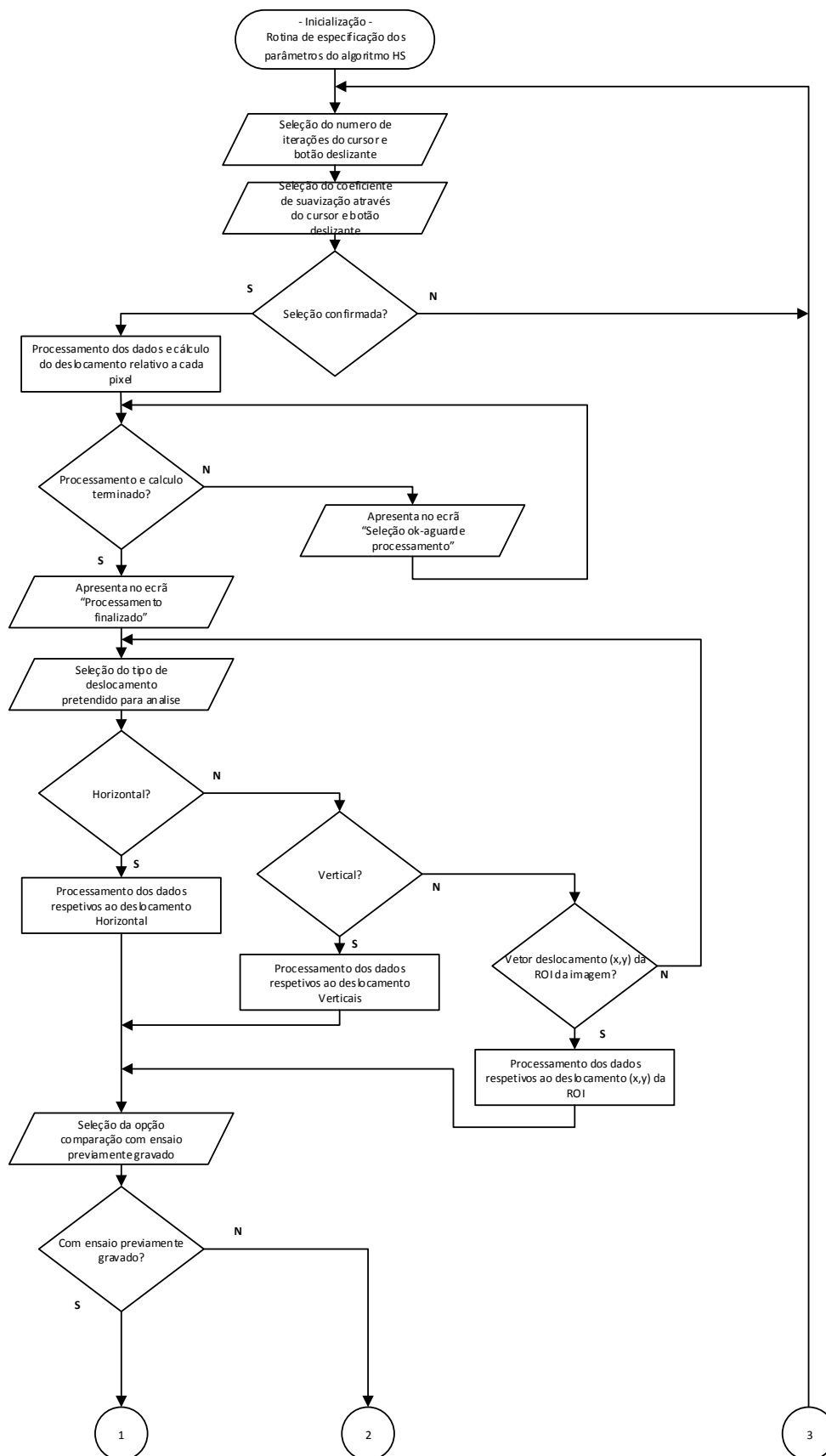


Figura A.7 – Fluxograma da janela de especificação do algoritmo HS

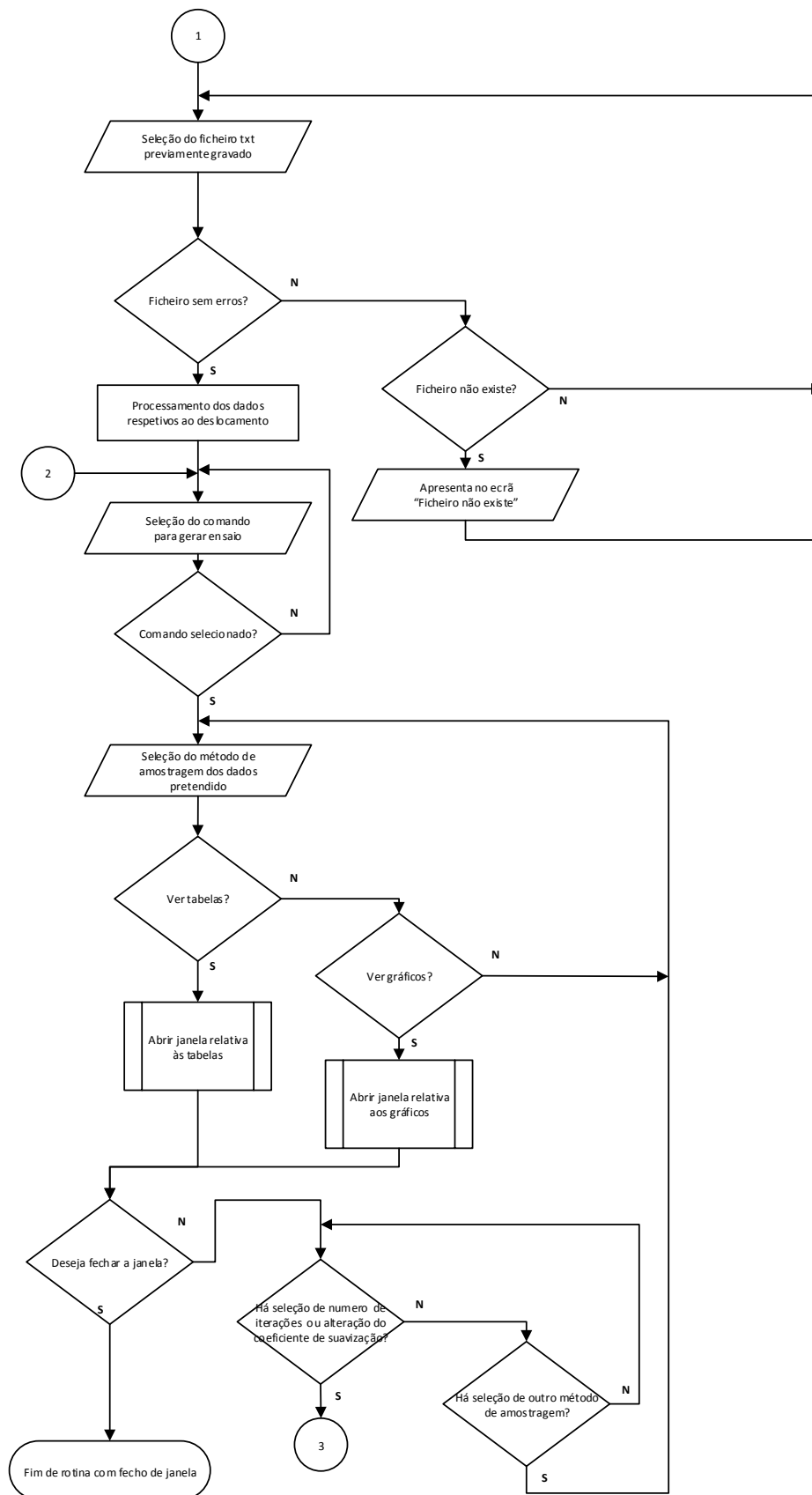


Figura A.8 – Fluxograma da janela de especificação do algoritmo HS (continuação)

○ **Representação gráfica**

hs_def_output

ISEL
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Demonstração de resultados
- Algoritmo HS -

Sair

Parâmetros específicos do algoritmo HS

Definir o número de interações - ite: 100

Definir coeficiente de suavização - alfa: 1

numero de interações para obtenção do vetor (u,v) do fluxo ótico, para melhor. Um numero elevado de interações corresponde a uma maior precisão mas consequentemente maior necessidade de computação

Factor responsável pela suavização da imagem. Quanto maior, mais opaca se torna, i.e., menor definição de contornos/padrões, mas melhor determinação de movimentos de corpos inelásticos

Confirmar

ISEL
Helder Fernandes
v0.0

a)

hs_def_output

ISEL
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Demonstração de resultados
- Algoritmo HS -

Sair

Parâmetros específicos do algoritmo HS

Definir o número de interações - ite: 100

Definir coeficiente de suavização - alfa: 1

numero de interações para obtenção do vetor (u,v) do fluxo ótico, para melhor. Um numero elevado de interações corresponde a uma maior precisão mas consequentemente maior necessidade de computação

Factor responsável pela suavização da imagem. Quanto maior, mais opaca se torna, i.e., menor definição de contornos/padrões, mas melhor determinação de movimentos de corpos inelásticos

Confirmar

Seleção ok - processamento finalizado

Definir o tipo de ensaio pretendido

Tipo de deslocamento pretendido: Vertical

Deseja comparar com dados de um outro ensaio: Nao Sim

Inserir o ficheiro .TXT que contenha o ensaio: Ensaio_ldt_1.txt

Gerar ensaio

Seleção ok

Selecione Forma de representação dos dados pretendida - Tabelas / Graficos-

Gerar tabelas

Gerar gráficos

ISEL
Helder Fernandes
v0.0

b)

Figura A.9 – Aspeto visual da Janela de especificação do algoritmo HS- a) Aspeto no arranque – b) Aspeto após preenchimento dos campos obrigatórios

• Fluxograma da janela para geração de tabelas

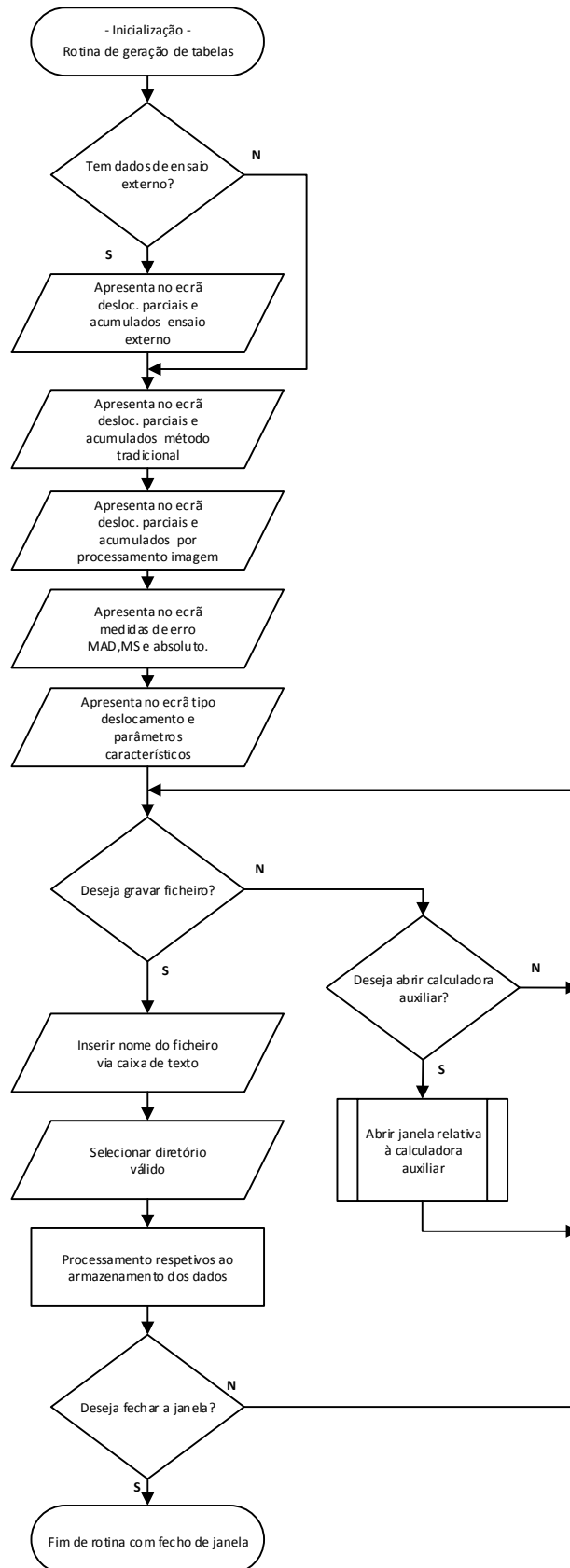
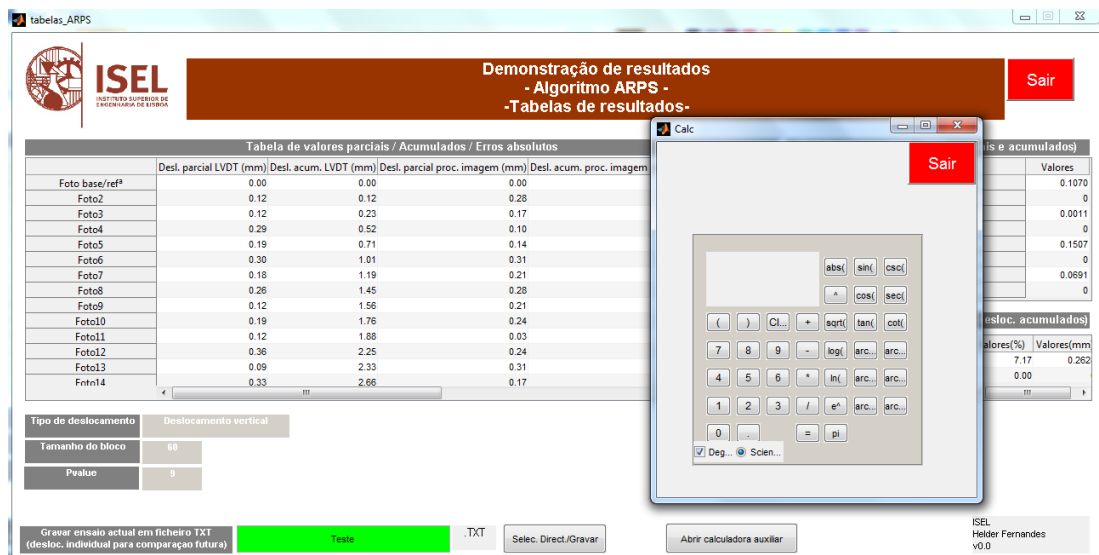


Figura A.10 – Fluxograma da janela para geração de tabelas

○ Representação gráfica



a)



b)

Figura A.11 – Aspeto visual da Janela para gerar tabelas- a) Aspeto no arranque – b) Aspeto após seleção da opção calculadora e gravação de ficheiro contendo dados do ensaio

• Fluxograma da janela para geração de gráficos

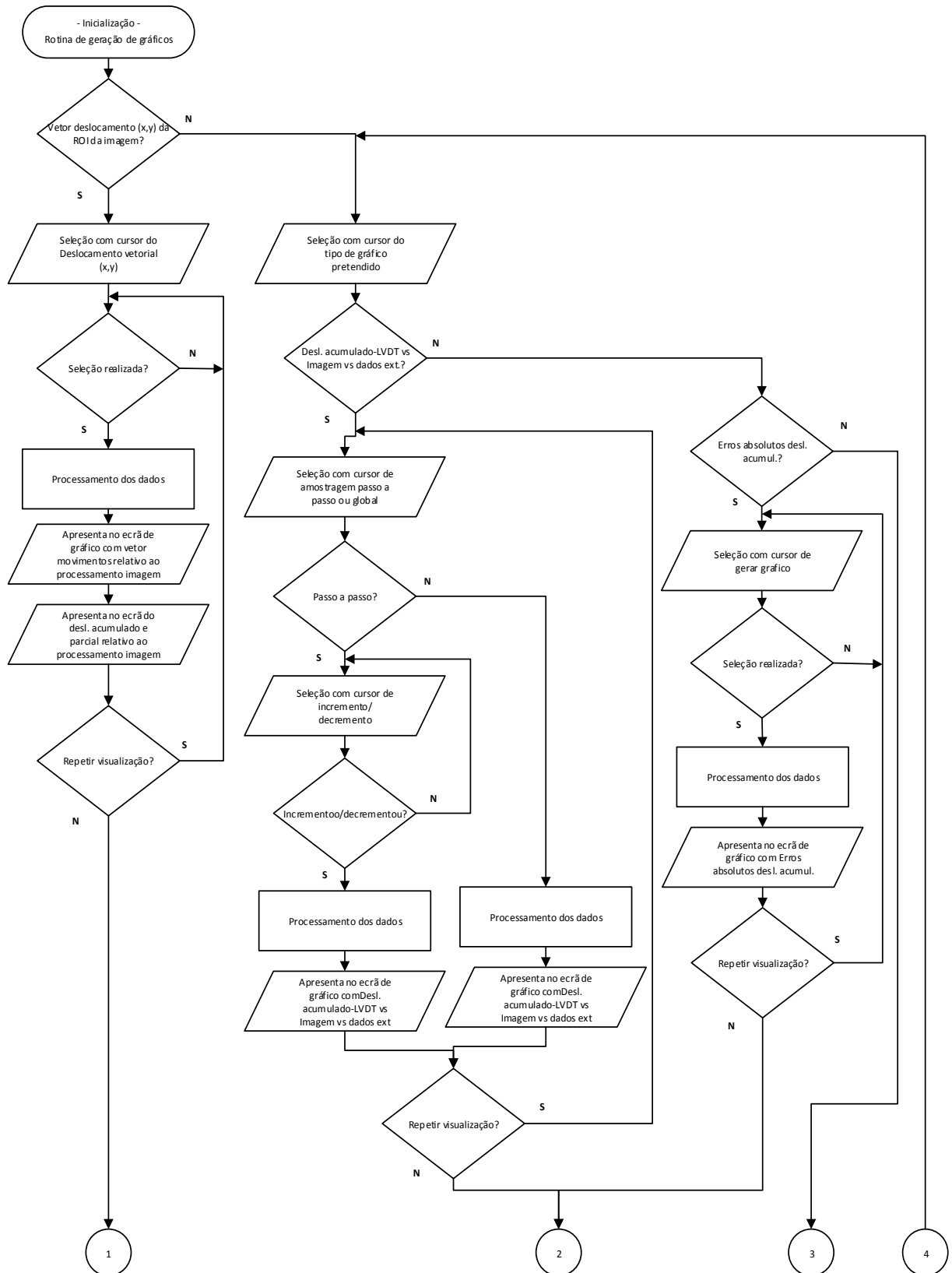


Figura A.12 – Fluxograma da janela para geração de gráficos (para o algoritmo ARPS)

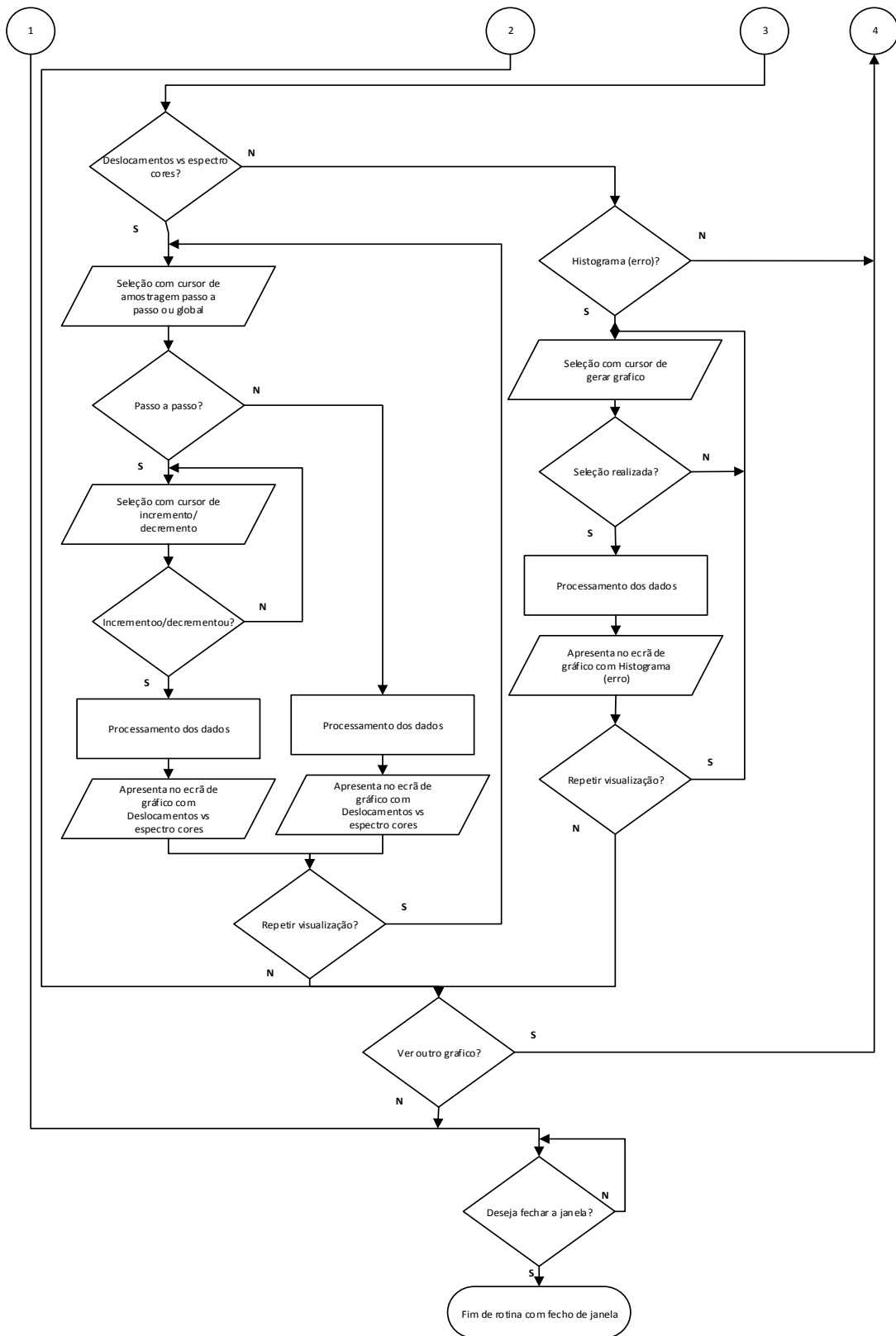
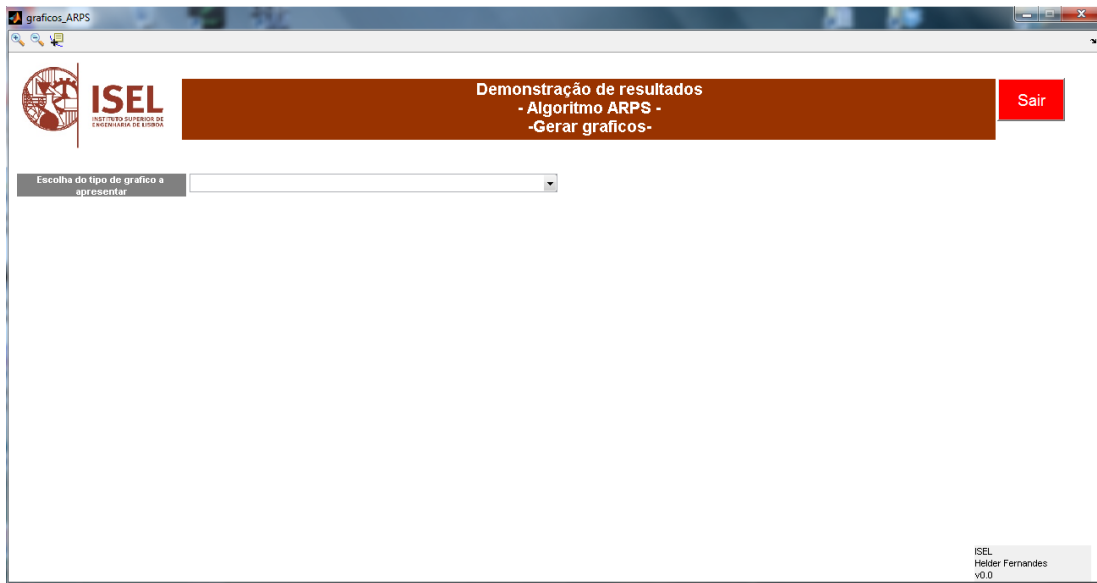
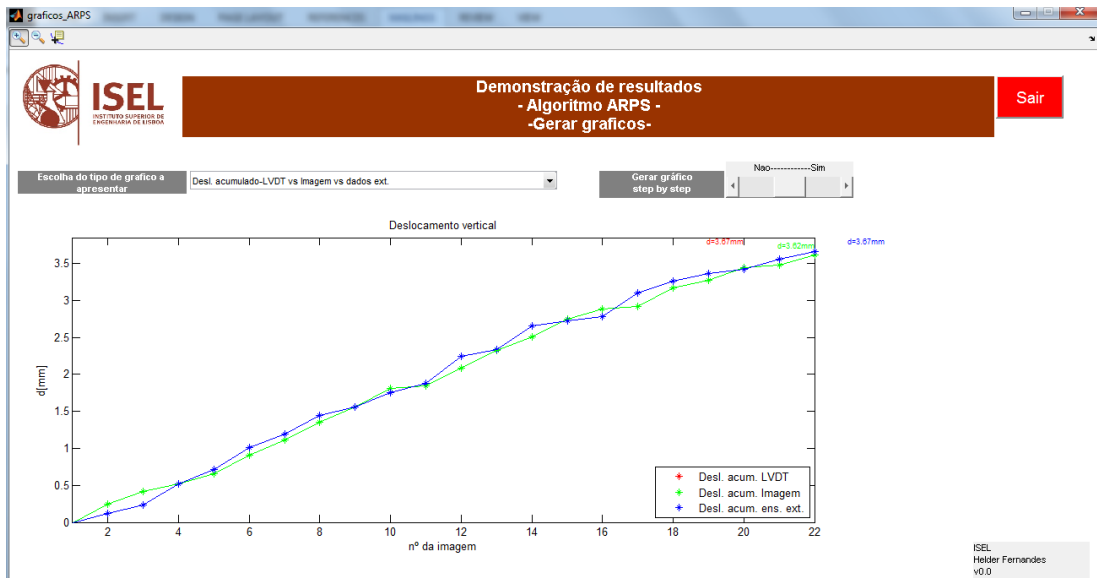


Figura A.13 – Fluxograma da janela para geração de gráficos (para o algoritmo ARPS) (continuação)

○ Representação gráfica



a)

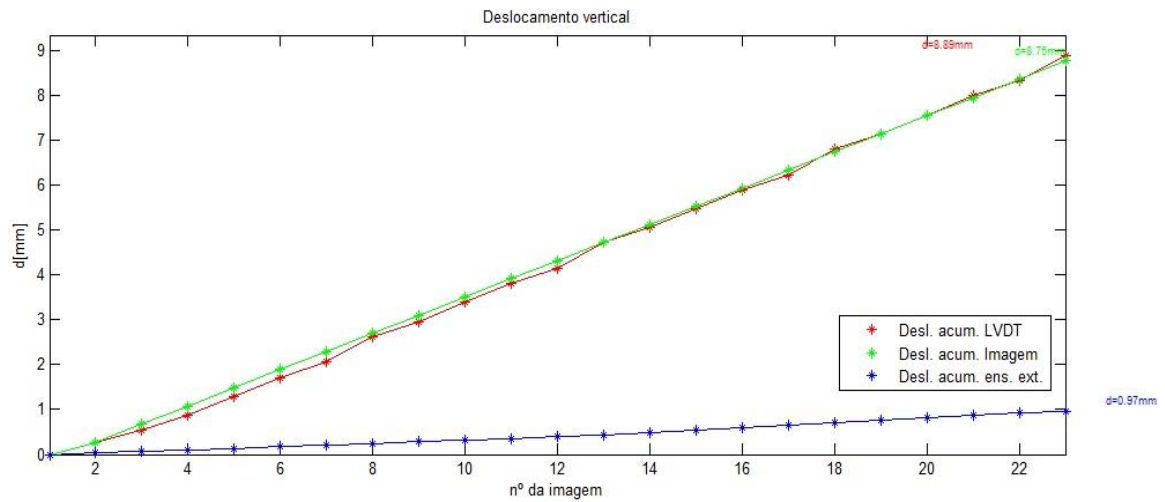


b)

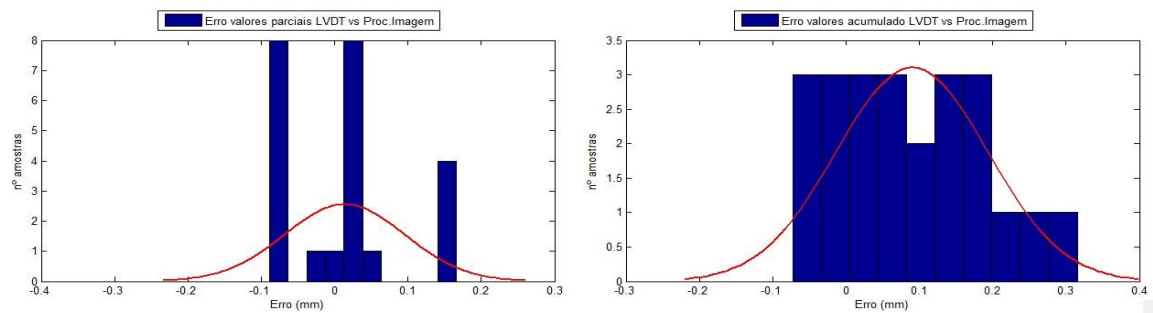
Figura A.14 – Aspeto visual da Janela para gerar gráfico (para o algoritmo ARPS) - a) Aspeto no arranque – b) Aspeto após seleção da opção para visualizar gráfico de deslocamentos acumulados

Anexo 2- Outputs do programa

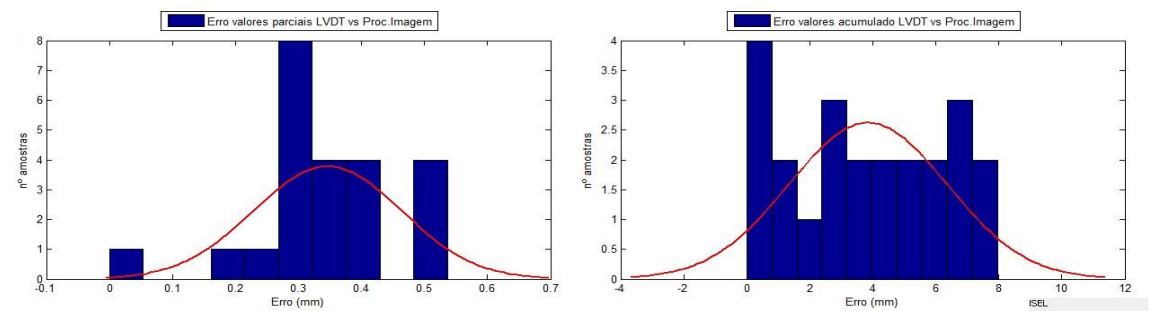
- Ensaios de Tração
 - Ensaio 1 – Ensaio realizado com provete de polímero



a)



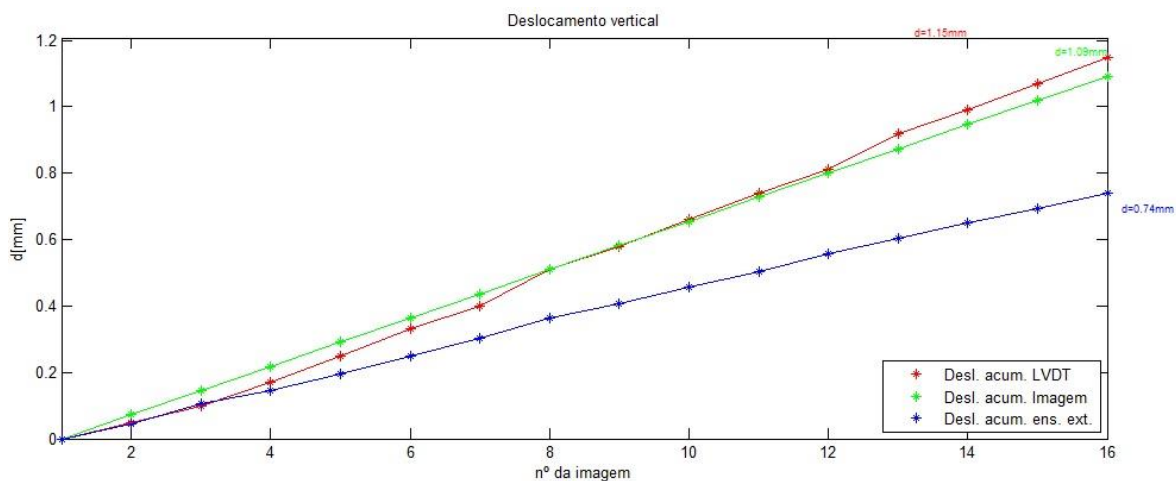
b)



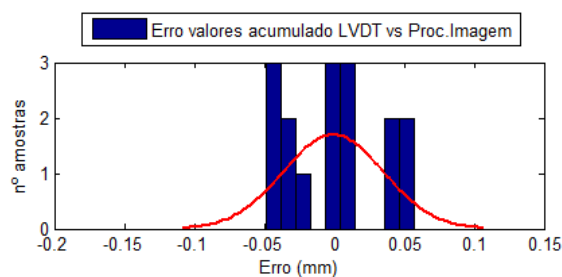
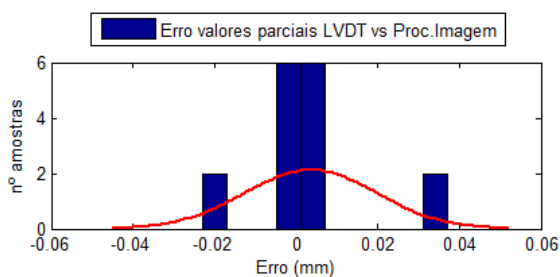
c)

Figura A.15 – a) Gráfico de deslocamentos acumulados; b) Histogramas de erro ARPS; C) Histogramas de erro HS

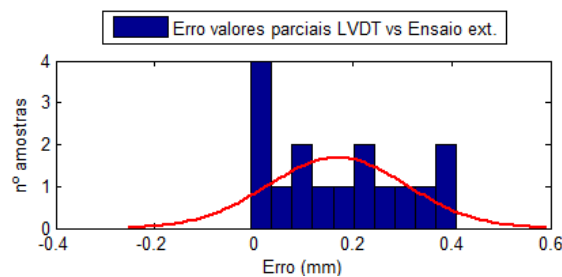
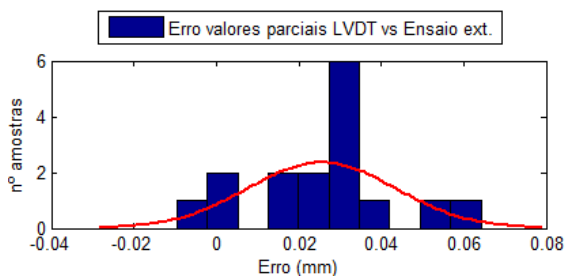
○ Ensaio 2 – Ensaio realizado com provete de acrílico



a)



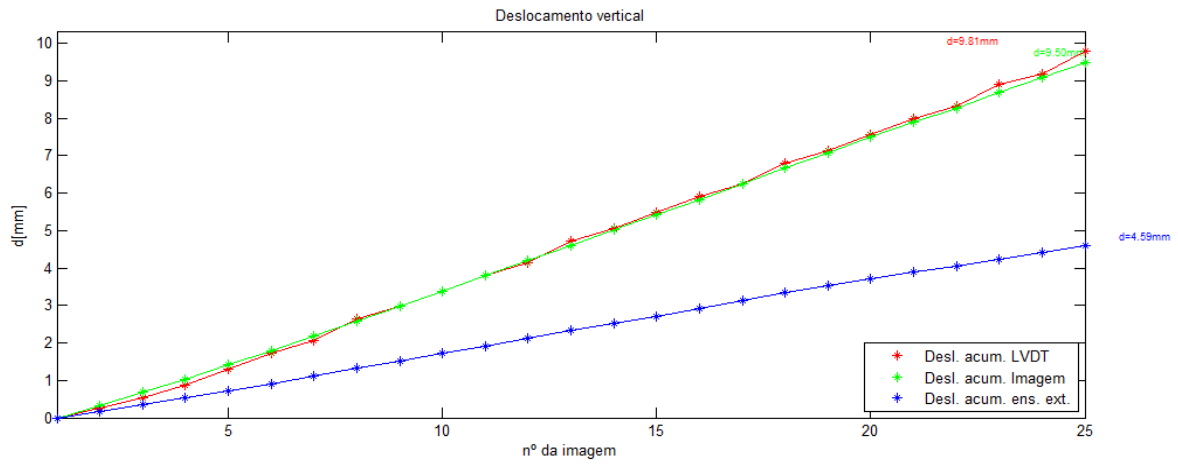
b)



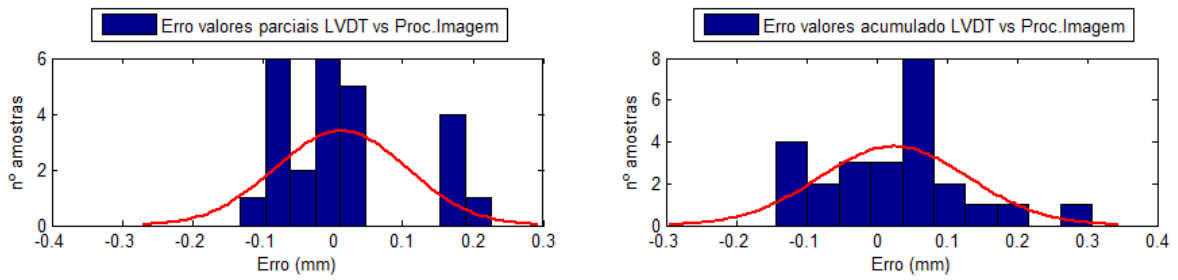
c)

Figura A.16 – a) Gráfico de deslocamentos acumulados; b) Histogramas de erro ARPS; C) Histogramas de erro HS

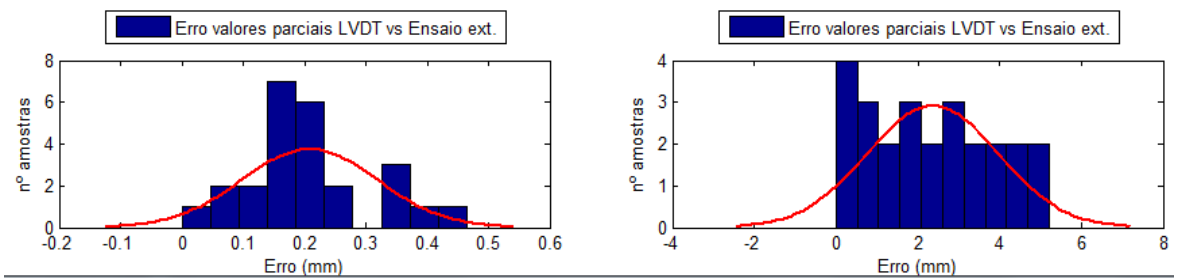
○ Ensaio 3 – Ensaio realizado com provete de PVC



a)



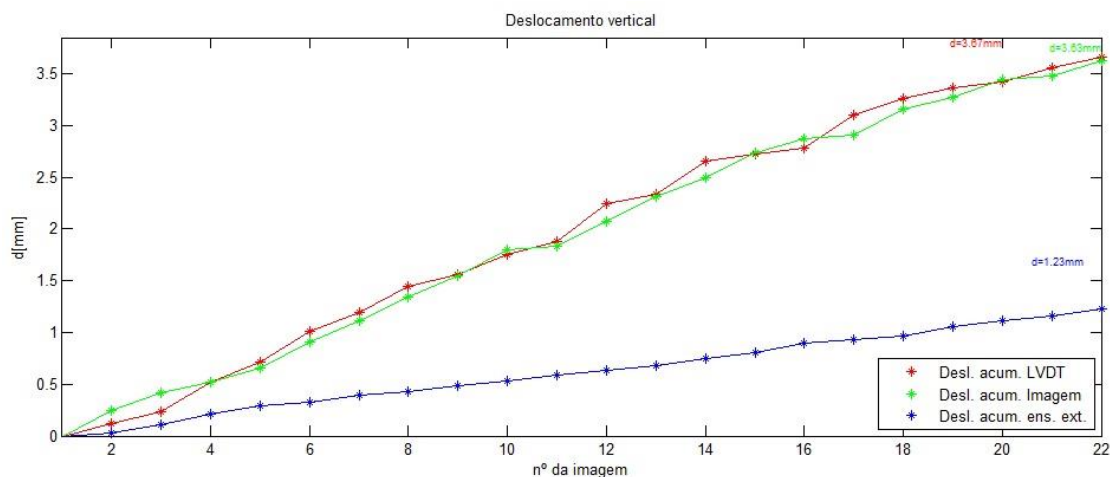
b)



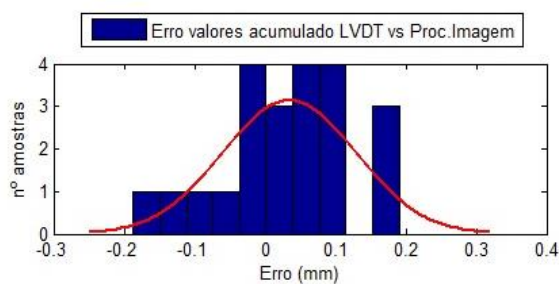
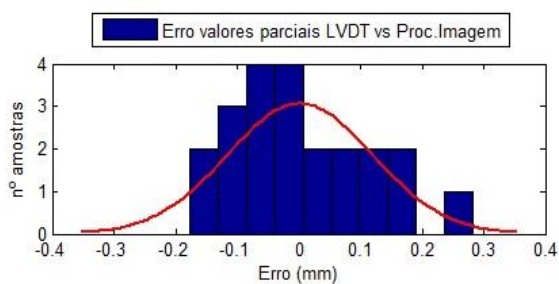
c)

Figura A.17 – a) Gráfico de deslocamentos acumulados; b) Histogramas de erro ARPS; C) Histogramas de erro HS

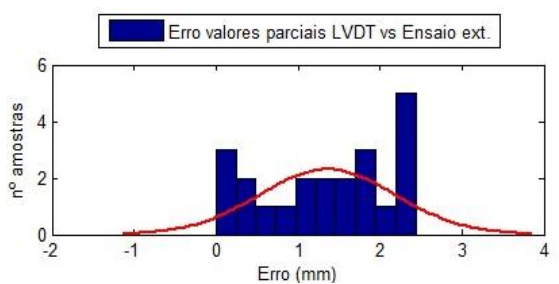
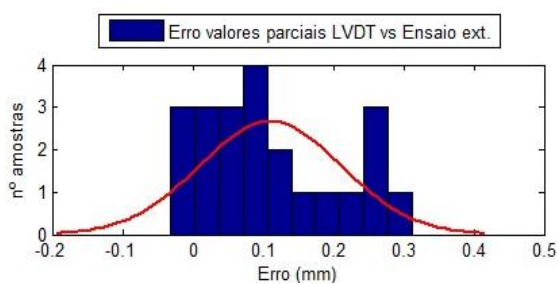
- Ensaios de compressão/flexão
 - Ensaio 4 – Ensaio realizado com recurso a dados físicos cedidos pelo orientado



a)



b)



c)

Figura A.18 – a) Gráfico de deslocamentos acumulados; b) Histogramas de erro ARPS; C) Histogramas de erro HS

- Ensaio de compressão/flexão teórico
 - Ensaio 5 – Ensaio com deslocamento *pixel a pixel* gerado em Matlab

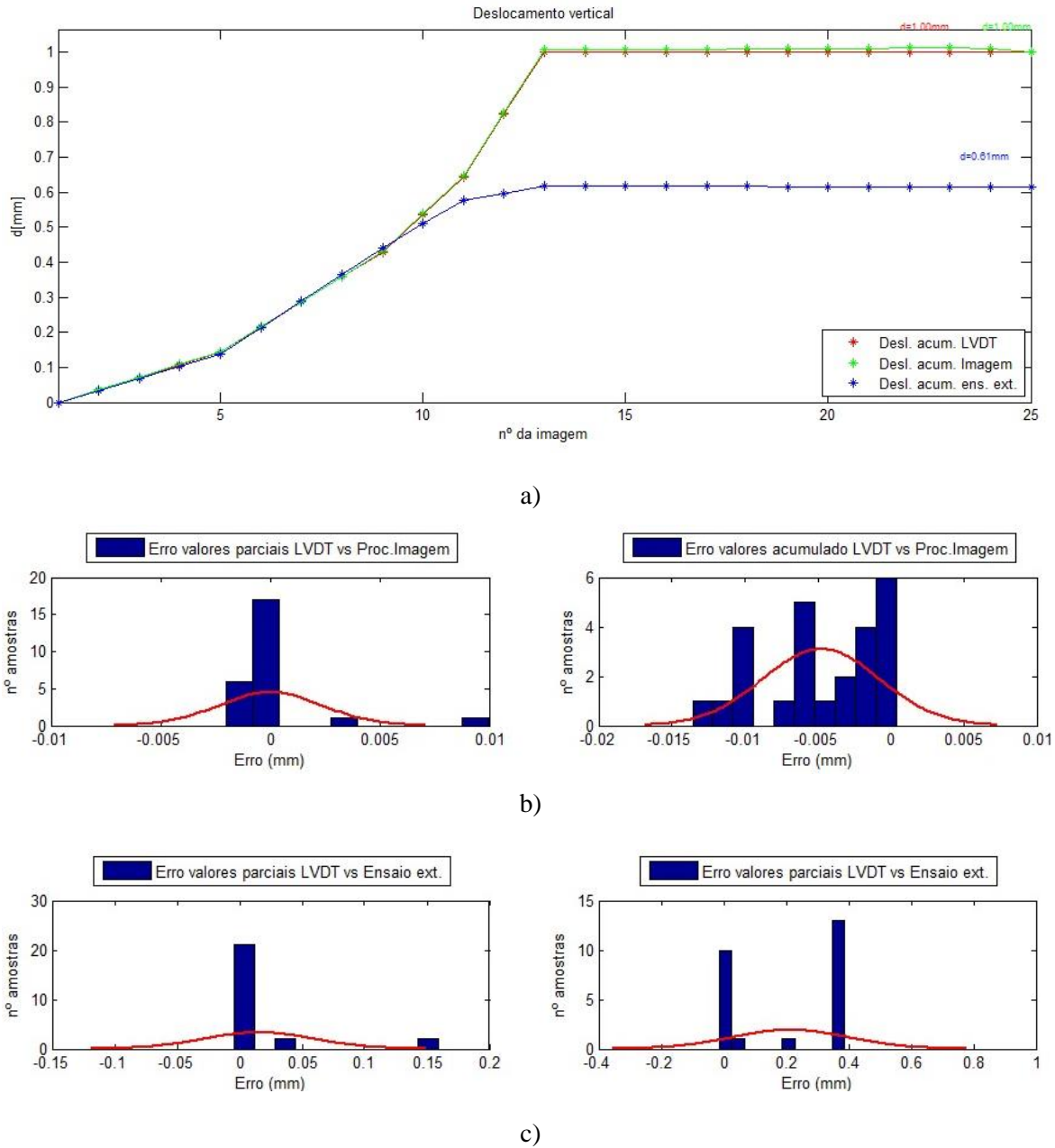
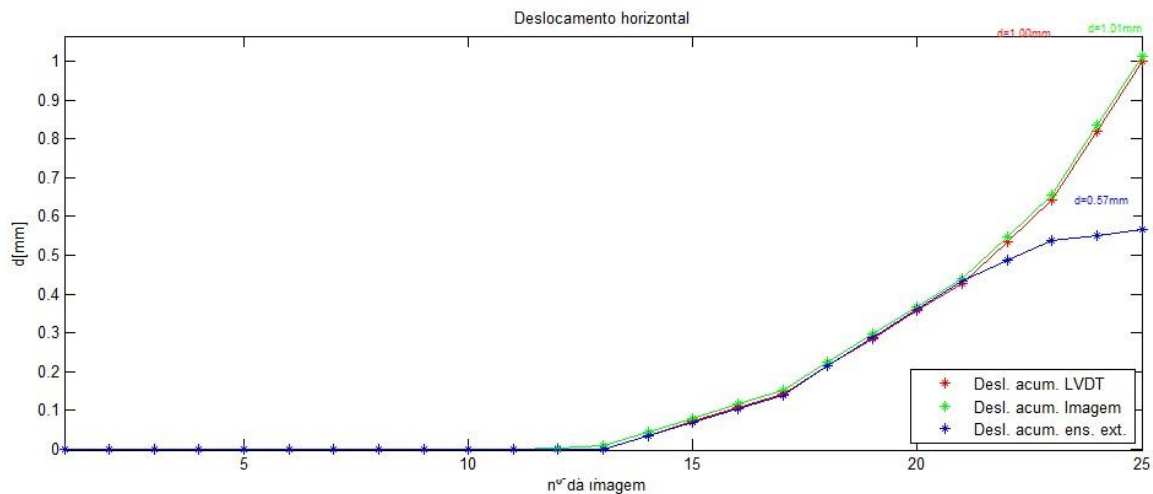
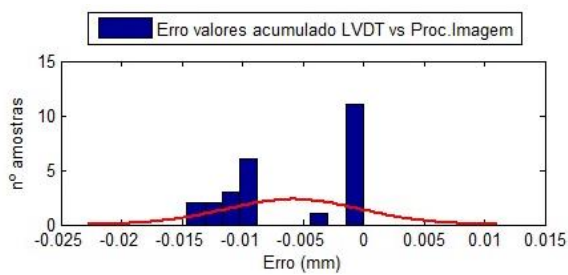
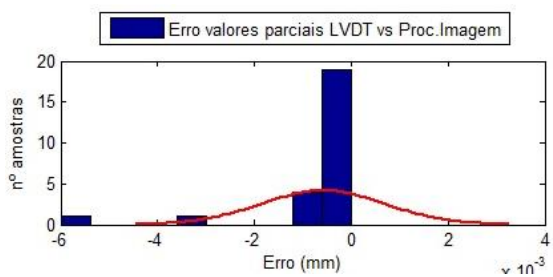


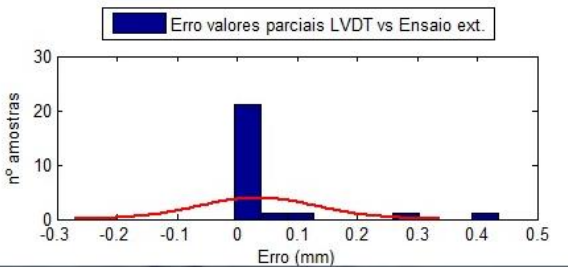
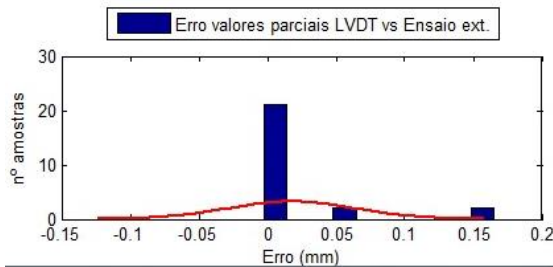
Figura A.19 – a) Gráfico de deslocamentos acumulados; b) Histogramas de erro ARPS; C) Histogramas de erro HS



a)



b)



c)

Figura A.20 – a) Gráfico de deslocamentos acumulados; b) Histogramas de erro ARPS; C) Histogramas de erro HS

Anexo 3- Especificação do ficheiro de texto de entrada de dados

Pretende-se neste anexo demonstrar de forma simples a estrutura que o ficheiro de texto (.TXT) de entrada de dados deverá apresentar. Este facto é muito importante pois é lido o nome de cada imagem, a dimensão da amostra assim como os deslocamentos reais segundo o plano x e y (horizontais e verticais) registados por método convencional.

Este ficheiro deverá estar no diretório onde se encontram as imagens, pois será também gravado no programa a localização da pasta, para que sempre que necessário seja carregada a imagem, não sendo necessário carregar todas as imagens em memória volátil, mas sim somente o seu nome e apontador para a localização.

A verde encontram-se os dados que devem ser introduzidos criados pelo utilizador com base na sua amostra. A inexistência de valores para algum dos deslocamentos deverá ser colocado o valor “0” zero. O número de deslocamentos verticais e horizontais deve sempre perfazer o número de imagens do ensaio. O primeiro valor de deslocamento é sempre zero. O texto “ensaio_lab_lvdt_v” e “ensaio_lab_lvdt_h” representam o início da leitura dos dados de deslocamento relativo ao movimento vertical e horizontal.

- Estrutura do ficheiro:

```
NomeDaImagemReferencia.Formato
NomeDaImagem2.Formato
...
...
NomeDaImagemN.Formato
ensaio_lab_lvdt_v
0
ValorNumericoDoDeslocamentoVerticalImagemReferenciaPara2
ValorNumericoDoDeslocamentoVerticalImagem2Para3
...
...
ValorNumericoDoDeslocamentoVerticalImagemN-1ParaN
ensaio_lab_lvdt_h
0
ValorNumericoDoDeslocamentoHorizontalImagemReferenciaPara2
ValorNumericoDoDeslocamentoHorizontalImagem2Para3
...
...
ValorNumericoDoDeslocamentoHorizontalImagemN-1ParaN
```

