



IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NO PLANO PELA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM

JOSÉ DAVIDE LIMA ROSAS

outubro de 2019

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NO PLANO PELA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM

José Davide Lima Rosas
Nº1160512

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Engenharia Mecânica



IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NO PLANO PELA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM

José Davide Lima Rosas
Nº1160512

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Hernâni Miguel Reis Lopes.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto
Professor adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes
Professor adjunto, ISEP

Coorientador

Doutor Jorge Manuel Costa Da Fonseca Justo
Professor adjunto, ISEP

Arguente

Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro
Professor adjunto, IPB

AGRADECIMENTOS

Na elaboração da presente dissertação, gostaria de exprimir o meu reconhecimento a todas as pessoas e entidades que contribuíram nos vários trabalhos realizados. Gostaria, no entanto, de agradecer especialmente a algumas pessoas que tiveram um papel acrescido durante a realização da mesma.

Primeiramente ao Professor Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes, orientador deste projeto, pelo inestimável conhecimento científico transmitido, pelas críticas relevantes, por todas as palavras de incentivo e a total disponibilidade durante a realização do presente trabalho.

Ao Professor Doutor Jorge Manuel Costa Da Fonseca Justo, coorientador deste projeto, pelo seu rigor científico no auxílio e esclarecimento de dúvidas. Adicionalmente pela cedência do espaço no Laboratório de Mecânica Aplicada.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer aos meus pais em especial à minha mãe pelo encorajamento e carinho sempre manifestado, aos meus irmãos pelo valioso apoio em todos os momentos exigentes e aos meus amigos sempre presentes durante o percurso académico.

PALAVRAS CHAVE

Correlação digital de imagem, Desenvolvimento de sistema DIC, Fabrico de padrões de *speckle*, Medição do campo de deformações, Qualidade do padrão de *speckle*, Programas de correlação digital de imagem, Ensaio de tração, Ensaio a elevadas taxas de deformação.

RESUMO

O presente documento descreve o estudo e implementação de um sistema dedicado à medição dos campos de deslocamentos e deformações no plano, baseados na técnica de correlação digital de imagem. O seu princípio de funcionamento assenta na correlação de imagens digitais com padrões aleatórios de *speckle* captados da superfície do objeto, para diferentes estados da sua deformação. O documento inicia com uma revisão bibliográfica da técnica que aborda os princípios básicos e as variáveis relevantes para o seu funcionamento. Para implementação do sistema foi necessário desenvolver um programa que permite analisar a qualidade das imagens captadas pela câmara e, através deste, ajustar os diversos elementos que o compõem. Neste programa foram incluídas ferramentas que permitem a análise e classificação dos padrões de *speckle*. Através destas ferramentas foram analisados os padrões de *speckle* produzidos por diferentes processos de fabrico, sendo selecionado o processo de transferência por adesão, por apresentar as melhores características. Em seguida, são analisados diversos programas dedicados à correlação digital de imagem e selecionado o programa que apresenta o desempenho global mais satisfatório. Posteriormente, são realizados diversos ensaios de tração com o propósito de validar o campo de deformações medido com o sistema implementado, tendo como referência as deformações medidas com um extensómetro mecânico e o campo de deformações obtido pelo método de elementos finitos. Através deste estudo foi possível caracterizar a resolução e a exatidão das medições, bem como, identificar as limitações e capacidades do sistema implementado. Foram igualmente realizados ensaios de tração a elevadas taxas de deformação através da barra de Hopkinson, os quais permitiram explorar novos domínios de aplicação desta técnica e a definição de novos procedimentos.

Por fim, são apresentadas as conclusões principais e resultados alcançados neste trabalho, a partir dos quais são traçadas linhas orientadoras para a realização de trabalhos futuros.

KEYWORDS

Digital Image Correlation, DIC system Development, Speckle pattern, Deformation field, Speckle Pattern Quality, Digital image correlation programs, Tensile test, High strain rate tests.

ABSTRACT

The current document describes the study and implementation of a dedicated system to measure displacement and deformations of an object. This is based on a correlation of digital images with random speckle patterns captured from an object's surface during different states of its deformation.

A first approach details the basic principles and variables relevant to the operation of this technique. Regarding system implementation, it was necessary to develop a software to analyse the quality of the images captured by the camera and support to adjust to various elements of the object being scanned.

This software includes tools that allows the analysis and classification of speckle patterns. The speckle patterns produced by different manufacturing processes are analysed and the adhesion transfer process is selected because of its better characteristics.

Different types of digital image correlation software are evaluated and the software with the most satisfactory overall performance is selected. Consequently, several tensile tests are performed with the purpose of validating the deformation field measured with the implemented system.

With this study it was possible to stablish the resolution and accuracy of measurements, as well as identify the limitations and capabilities of the implemented system. Tensile tests were also performed at high strain rates through the Hopkinson bar technique, which allowed to explore new matters of application with this technique.

Results and conclusions are shown at the end of this document, offering some guidelines for future work.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três Dimensões
AVI	<i>Audio Video Interleave</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
DICe	<i>Digital Image Correlation engine</i>
DP	Desvio padrão
FIB	<i>Focused Ion Beam</i>
FOV	<i>Field of View</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISIS	<i>In Situ Storage Image Sensors</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LET	Laboratório de Ensaios Tecnológicos
LMA	Laboratório de Mecânica Aplicada
LOME	Laboratório de Ótica e Mecânica Experimental
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
M	Média aritmética
MEF	<i>Finite Element Method</i>
MIG	<i>Mean Intensity Gradient</i>
Min-GW	<i>Minimalistic GNU for Windows</i>
MP4	<i>Moving Picture Experts Group</i>
MSF	<i>Mean Subset Flutuation</i>
NCC	<i>Normalized Cross Correlation</i>
NI	<i>National Instruments</i>
Nº	Número
NSSD	<i>Normalized Sum of Squared Differences</i>
QOI	<i>Quantity of interest</i>
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>
ROI	<i>Region of interest</i>
SHBT	<i>Split Hopkinson Bar Technique</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>

SOD	<i>Stand off distance</i>
SSD	<i>Sum of Squared Differences</i>
STEP	<i>STandard for the Exchange of Product model data</i>
USAF	<i>United States Air Force</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VDIC	<i>Volumetric Digital Image Correlation</i>
VSG	<i>Virtual Strain Gauge</i>
WTP	<i>Water Transfer Printing</i>
ZNSSD	<i>Zero-Mean Normalised Sum of Squared Differences</i>
ZSSD	<i>Zero-Mean Sum of Squared Differences</i>

Lista de Unidades

Hz	Hertz
lp	Pares de linhas
N	Newton
°C	Grau Celsius
Pa	Pascal
s	Segundos
m	Metro
<i>fps</i>	<i>Fotogramas por segundo – (Frames per second)</i>

Lista de Símbolos

A_0	Área da secção reta das barras
E_0	Módulo de elasticidade das barras
L_0	Comprimento de referência
c_0	Velocidade de propagação do material da barra
$\dot{\epsilon}_n$	Taxa de deformação normal
%	Porcentagem
ϵ_r	Deformação real
ϵ_I	Onda de deformação incidente
ϵ_R	Onda de deformação refletida
ϵ_T	Onda de deformação transmitida
δ_f	Representa o <i>mean intensity gradient</i>
σ_r	Tensão real
d	Diâmetro do grão de <i>speckle</i>
D	Deslocamento por exposição
ϵ	Deformação
ϵ_{xx}	Componente cartesiana linear de deformação segundo o eixo xx
ϵ_{yy}	Componente cartesiana linear de deformação segundo o eixo yy
p	Dimensão individual dos píxeis no sensor da câmara
pH	Escala adimensional para especificar a acidez de uma solução aquosa

R	Linhas revolvidas
S	Escala da imagem
V	Velocidade do ensaio
A	Secção reta do provete
P	Número de píxeis analisados
Sp	Representa o <i>mean subset fluctuation</i>
T	Tempo de exposição
F	Função intensidade de referência
F_L	Abertura numérica da lente
f_L	Distância focal da lente
G	Função intensidade deformada
l	Distância da câmara ao objeto
l_p	Comprimento do provete
n	Número de píxeis ocupados no sensor por um grão <i>speckle</i>
t	Tempo
u	Translação no eixo das abcissas
v	Translação no eixo das ordenadas
x	Coordenada cartesiana das abcissas de referência
χ	Valor da função objetivo
x'	Coordenada cartesiana das abcissas deformada
y	Coordenada cartesiana das ordenadas de referência
y'	Coordenada cartesiana das ordenadas deformada
ΔL	Extensão
γ_{xy}	Deformação de corte ou distorção no plano xy
σ	Tensão de cedência

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Adiabática	Transformação termodinâmica em que não há troca de calor com o ambiente
<i>Aliasing</i>	Fenômeno em que ocorre a distorção do sinal devido a uma taxa insuficiente na amostragem de dados
Isotropia	Propriedade que caracteriza as substâncias que possuem as mesmas propriedades físicas independentemente da direção
<i>Speckle</i>	Padrão normalmente aplicado ao provete formado por grãos pretos circulares com dimensão aproximada e localização aleatória
<i>Subset</i>	Porção normalmente quadrada da imagem que é utilizada para calcular coordenadas ou deslocamentos
<i>Stereo</i>	Indica a utilização de um sistema com dois ou mais aparelhos para captura ou emissão de informação

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL TÍPICA PARA A TÉCNICA DIC-2D (ADAPTADO DE [10]).	38
FIGURA 2 - EXEMPLOS DE PADRÕES <i>SPECKLE</i> COM PROPRIEDADES FAVORÁVEIS (ADAPTADO DE [17]).	39
FIGURA 3 - EXEMPLOS DE PADRÕES <i>SPECKLE</i> COM PROPRIEDADES DESFAVORÁVEIS (ADAPTADO DE [17]).	39
FIGURA 4-ESQUEMA DA CONVERSÃO DE INTENSIDADE CONTÍNUA EM DISCRETA NO SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGEM (ADAPTADO DE [9]).	40
FIGURA 5-ESQUEMA DE MATRIZES DAS IMAGENS RGB (ADAPTADO DE [20]).	41
FIGURA 6-REPRESENTAÇÃO DA EVOLUÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NO <i>SUBSET</i> (ADAPTADO DE [16]).	42
FIGURA 7-COMPONENTES CARTESIANAS DA DEFORMAÇÃO NO PLANO XY. (ADAPTADO DE [23]).	43
FIGURA 8- A) MATRIZ INTENSIDADE DE UM <i>SUBSET</i> ; B) CAMPO DE INTENSIDADE INTERPOLADA PELA FUNÇÃO <i>SPLINE</i> BILINEAR; C) CAMPO DE INTENSIDADE INTERPOLADA PELA FUNÇÃO <i>SPLINE</i> CÚBICA (ADAPTADO DE [24]).	44
FIGURA 9-ESTRUTURA DO PROGRAMA DE CALIBRAÇÃO E AQUISIÇÃO DE IMAGEM.	49
FIGURA 10-INTERFACE DO PROGRAMA E PRINCIPAIS REGIÕES DE ANÁLISE.	51
FIGURA 11-INTERFACE GRÁFICA DA FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA INTENSIDADE.	53
FIGURA 12-INTERFACE GRÁFICA DA FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DO <i>SPECKLE</i> .	54
FIGURA 13-INTERFACE GRÁFICA DA FERRAMENTA DE ANÁLISE DA DIMENSÃO DO <i>SPECKLE</i> .	55
FIGURA 14-INTERFACE GRÁFICA DA FERRAMENTA PARA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS.	56
FIGURA 15-ESTRUTURA DO PROGRAMA DE PRÉ-PROCESSAMENTO.	57
FIGURA 16-INTERFACE DO PROGRAMA DE PRÉ-PROCESSAMENTO E EXEMPLO DA CONVERSÃO DE 12 PARA 8 BITS.	57
FIGURA 17-ORGANOGRAMA DOS PROCESSOS DE FABRICO DOS PADRÕES DE <i>SPECKLE</i> [18].	61
FIGURA 18-PADRÃO DE <i>SPECKLE</i> NANO/MICRO, OBSERVADO ATRAVÉS DE UM MICROSCÓPIO ELETRÓNICO (ADAPTADO DE [34]).	63
FIGURA 19-PADRÃO <i>SPECKLE</i> CRIADO PELA TÉCNICA SPRAY.	64
FIGURA 20-PADRÃO <i>SPECKLE</i> PRODUZIDO PELO PROCESSO DE FABRICO POR AEROGRAFIA, COM DEPOSIÇÃO DE TINTA PRETA SOBRE A TINTA BRANCA.	64
FIGURA 21-ROLOS COM DIFERENTES RELEVOS PARA FABRICO DE PADRÕES <i>SPECKLE</i> (ADAPTADO DE [36]).	65
FIGURA 22 - PADRÃO <i>SPECKLE</i> PRODUZIDO PELO PROCESSO DE FABRICO POR MARCADOR.	66
FIGURA 23 - PADRÃO <i>SPECKLE</i> PRODUZIDO PELO PROCESSO DE FABRICO POR DEPOSIÇÃO DE TONER.	66
FIGURA 24 - PADRÃO <i>SPECKLE</i> PRODUZIDO PELO PROCESSO DE FABRICO POR TRANSFERÊNCIA TÉRMICA DE TONER (ADAPTADO DE [37]).	67
FIGURA 25 – O PROCESSO DE FABRICO DOS PADRÕES DE <i>SPECKLE</i> POR GRAVAÇÃO LASER: A) PADRÃO <i>SPECKLE</i> GERADO COMPUTACIONALMENTE; B) EQUIPAMENTO DE GRAVAÇÃO LASER; C) PADRÃO <i>SPECKLE</i> GRAVADO NUM PROVETE (ADAPTADO DE [38]).	68
FIGURA 26 - PADRÃO <i>SPECKLE</i> PRODUZIDO PELO PROCESSO DE FABRICO DE MÁSCARA.	68

FIGURA 27-PRINCIPAIS ETAPAS DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA POR ADESÃO [39]: A) REMOÇÃO DA PELÍCULA PROTETORA EXPONDO O PADRÃO; B) COLAGEM DO PADRÃO NO PROVETE E PRESSIONAR; C) HUMIDIFICAÇÃO DO PAPEL COM ÁGUA; D) REMOÇÃO DO PAPEL TRANSPORTADOR DO <i>SPECKLE</i> ; E) SECAGEM DO PADRÃO <i>SPECKLE</i>	69
FIGURA 28 – PADRÃO <i>SPECKLE</i> PRODUZIDO PELO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA POR ADESÃO.....	70
FIGURA 29- CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DAS TÉCNICAS DE FABRICO DE PADRÕES <i>SPECKLE</i>	70
FIGURA 30 – MONTAGEM EXPERIMENTAL USADA NA CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE <i>SPECKLE</i> PRODUZIDOS POR DIFERENTES PROCESSOS.....	71
FIGURA 31-GERAÇÃO DO PADRÃO DE <i>SPECKLE</i> USANDO O PROGRAMA COMERCIAL <i>SPECKLE GENERATOR</i> ®.	72
FIGURA 32 - INTERFACE DE TRABALHO DO <i>GOM CORRELATE 2D</i>	78
FIGURA 33 - INTERFACE DE TRABALHO DO PROGRAMA <i>NCORR</i>	79
FIGURA 34 - INTERFACE DE TRABALHO DO PROGRAMA <i>VIC-2D</i> (ADAPTADO DE [46]).	81
FIGURA 35- INTERFACE DE TRABALHO DO PROGRAMA <i>DICE</i>	82
FIGURA 36- INTERFACE DE TRABALHO DO PROGRAMA <i>MOIRÉ</i>	84
FIGURA 37-FERRAMENTA PARA ANÁLISE DO NÍVEL DE CONTRASTE NUMA IMAGEM.....	91
FIGURA 38- RESOLUÇÃO ESPACIAL DAS LENTES.	92
FIGURA 39- DETERMINAÇÃO DAS DISTORÇÕES NA LENTE KOWA® COM A APLICAÇÃO <i>CAMERA CALIBRATOR</i> DO <i>MATLAB</i> ®.	93
FIGURA 40-PROVETES FABRICADOS EM ALUMÍNIO COM DIMENSÕES SEGUNDO A NORMA NP EN 10002-1 2006.	94
FIGURA 41-PROCESSO DE FABRICO DO PADRÃO DE <i>SPECKLE</i> NOS PROVETES: A) APÓS DEPOSIÇÃO DE UMA FINA CAMADA DE TINTA BRANCA MATE; B) APÓS A TRANSFERÊNCIA DO PADRÃO POR ADESÃO.....	95
FIGURA 42-COMPONENTES UTILIZADOS NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.	96
FIGURA 43-COLOCAÇÃO DO EXTENSÓMETRO MECÂNICO PARA OBTENÇÃO DAS EXTENSÕES.	98
FIGURA 44-PLACA DE AQUISIÇÃO DE SINAL PARA AQUISIÇÃO DO VALOR DA FORÇA E DO DESLOCAMENTO PRODUZIDOS NA MÁQUINA DE TRAÇÃO.	99
FIGURA 45-PROCESSO DE SELEÇÃO E CONVERSÃO DAS IMAGENS PARA A ESCALA DE 8 BITS.....	99
FIGURA 46 - COMPARAÇÃO DAS EXTENSÕES OBTIDAS PELO EXTENSÓMETRO MECÂNICO E PELOS PROGRAMAS DE CORRELAÇÃO.....	100
FIGURA 47 - COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES OBTIDAS PELO EXTENSÓMETRO MECÂNICO E PELOS DIFERENTES PROGRAMAS DE CORRELAÇÃO.	101
FIGURA 48- ERRO RELATIVO DOS PROGRAMAS DE CORRELAÇÃO.....	102
FIGURA 49-AMBIENTE DE TRABALHO DO <i>ANSYS WORKBENCH</i>	103
FIGURA 50-VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO E LARGURA DO PROVETE (ADAPTADO DE [57]).	104
FIGURA 51 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO CONVENCIONAL E CORRIGIDA.	105
FIGURA 52 - DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE PROPORCIONALIDADE DOS MÓDULOS ELÁSTICO E PLÁSTICO PARA VALORES OBTIDOS DA CURVA REAL.	106
FIGURA 53 – DISCRETIZAÇÃO E QUALIDADE DA MALHA USADA NA SIMULAÇÃO: A) - PROVETE 3; B) – AMPLIFICAÇÃO DA ZONA COM REFINAMENTO DOS ELEMENTOS DE MALHA JUNTO AO FURO. ...	107

FIGURA 54-CAMPO DE DEFORMAÇÕES NA DIREÇÃO AXIAL DO PROVETE OBTIDAS POR MEF: - PROVETE 3; - PROVETE 4; - PROVETE 5.	108
FIGURA 55 – CAMPO DE DEFORMAÇÕES NA DIREÇÃO AXIAL DO PROVETE OBTIDAS PELA TÉCNICA DIC: - PROVETE 3; - PROVETE 4; - PROVETE 5.....	108
FIGURA 56-REPRESENTAÇÃO DA SECÇÃO PARA ANÁLISE DO PERFIL DAS DEFORMAÇÕES NA DIREÇÃO AXIAL DO PROVETE.	109
FIGURA 57 – REPRESENTAÇÃO DOS PERFIS DE DEFORMAÇÕES ϵ_y AO LONGO DA SECÇÃO TRANSVERSAL DOS PROVETES E CENTRADO COM OS FUIROS, OBTIDOS PELO MEF E PELA TÉCNICA DIC.	110
FIGURA 58-VISTA GLOBAL DA MONTAGEM PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS NA BARRA DE HOPKINSON.	112
FIGURA 59- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA BARRA DE HOPKINSON PARA ENSAIO DE TRAÇÃO (ADAPTADA DE [59]).	113
FIGURA 60-ESQUEMA EXEMPLIFICATIVO DOS TRÊS TIPOS DE ONDAS PRODUZIDAS DURANTE O ENSAIO (ADAPTADA DE [59]).	113
FIGURA 61 – PROVETES UTILIZADOS NOS ENSAIOS A ELEVADAS TAXAS DE DEFORMAÇÃO.	115
FIGURA 62 – IMAGENS DOS PROVETES APÓS O ENSAIO DE TRAÇÃO: A) SEM DESPRENDIMENTO DO PADRÃO; B) COM DESPRENDIMENTO DO PADRÃO.....	116
FIGURA 63 – CAMPO DE DEFORMAÇÕES NA DIREÇÃO AXIAL DOS PROVETES: - PROVETE 1; - PROVETE 2.	117
FIGURA 64 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO OBTIDA EM ENSAIOS DE TRAÇÃO A ELEVADAS TAXAS DE DEFORMAÇÃO.....	117
FIGURA 65 – TAXA DE DEFORMAÇÃO REGISTADA NOS ENSAIOS EM BARRA DE HOPKINSON.	118
FIGURA 66 – DESENHO TÉCNICO DOS PROVETES UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE ALTA VELOCIDADE (DESENHO FORNECIDO PELO INEGI).	133
FIGURA 67 – CURVA BILINEAR QUE DEFINE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PROVETES SIMULADOS.	134
FIGURA 68 – ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICO DE UM PADRÃO <i>SPECKLE</i> PELA TRANSFERÊNCIA POR ADESÃO.....	136
FIGURA 69 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DIC.....	140

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1-PRINCIPAIS PARÂMETROS EXTRÍNSECOS E A SUA INFLUÊNCIA NA TÉCNICA DIC.....	45
TABELA 2-VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TÉCNICA DIC PARA MEDIÇÕES NO PLANO.	46
TABELA 3-ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DOS PADRÕES DE <i>SPECKLE</i> FABRICADO PELOS DIFERENTES PROCESSOS DE FABRICO.	73
TABELA 4- COMPARAÇÃO QUALITATIVA DOS SOFTWARES AVALIADOS.	86
TABELA 5- PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS LENTES ANALISADAS.....	90
TABELA 6-DIMENSÕES DOS PROVETES PARA ENSAIO.....	95
TABELA 7-IDENTIFICAÇÃO DOS COMPONENTES REPRESENTADOS NA FIGURA 42.	96
TABELA 8-CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	98
TABELA 9- FORÇAS SELECIONADAS PARA SIMULAÇÃO MEF E O NÚMERO DO REGISTO DAS IMAGENS.	106

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Contextualização	31
1.2	Objetivos	31
1.3	Estrutura da dissertação	32
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
2.1	Evolução histórica da técnica DIC	35
2.2	Definição e variantes da técnica DIC.....	35
2.3	Procedimentos de implementação	36
2.4	Aplicações	37
2.5	Conceito da correlação digital de imagem.....	37
2.6	Padrão <i>speckle</i>	38
2.7	Imagem digital.....	40
2.8	Formulação.....	41
2.8.1	Interpolação da intensidade.....	44
2.8.2	Algoritmos sub-píxel.....	45
2.9	Parâmetros da técnica DIC.....	45
2.10	Vantagens e desvantagens.....	46
3	PROGRAMA DE AQUISIÇÃO	49
3.1	Descrição do programa	49
3.2	Calibração.....	50
3.3	Avaliação da qualidade	53
3.4	Aquisição	55
3.5	Programa de pré-processamento de dados.....	56

4	PADRÕES <i>SPECKLE</i>	61
4.1	Requisitos do padrão de <i>speckle</i>	62
4.2	Processos de fabrico dos padrões de <i>speckle</i>	62
4.2.1	Processos de fabrico nano/micro- <i>speckle</i>	62
4.2.2	Processos de fabrico macro- <i>speckle</i>	63
4.3	Avaliação da qualidade dos padrões de <i>speckle</i>	71
5	PROGRAMAS DE CORRELAÇÃO	77
5.1	Critérios de análise.....	77
5.1.1	<i>GOM Correlate</i>	77
5.1.2	<i>Ncorr</i>	79
5.1.3	<i>VIC-2D</i>	80
5.1.4	<i>DICe</i>	82
5.1.5	<i>Opticist-Moiré</i>	84
5.2	Análise comparativa.....	86
6	ENSAIOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	89
6.1	Avaliação e seleção do sistema de formação de imagem (lente).....	89
6.2	Preparação dos provetes	93
6.3	Procedimento dos ensaios experimentais	96
6.4	Pré-processamento dos dados e seleção do programa	99
6.5	Determinação do campo de deformações pelo MEF.....	103
6.5.1	Análise do campo de deformações nos provetes com furo	104
6.5.2	Análise do perfil das deformações axiais ao longo da secção do provete	109
6.6	Ensaio de tração a elevadas taxas de deformação	112
6.6.1	Descrição da barra de Hopkinson.....	113
6.6.2	Descrição da câmara de alta velocidade	114
6.6.3	Provetes e fabrico do padrão <i>speckle</i>	115
6.6.4	Descrição dos ensaios	116
6.6.5	Resultados.....	116
7	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	121
7.1	Conclusões	121

7.2	Propostas para trabalhos futuros	123
8	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	127
8.1	Artigos, livros, teses e páginas de <i>internet</i>	127
9	ANEXOS.....	133
9.1	Anexo 1 - Dimensões dos provetes para alta velocidade	133
9.2	Anexo 2 - Curva bilinear	134
9.3	Anexo 3 - Padrão <i>speckle</i>	135
9.4	Anexo 4 - Fluxograma.....	136
9.5	Anexo 5 - Programa de aquisição.....	141
9.6	Anexo 6 - Programa de pré-processamento	149

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A técnica atualmente conhecida como correlação digital de imagem (DIC) teve o seu início nos anos 80 com o desenvolvimento de algoritmos numéricos, realização de experiências e o uso de imagens gravadas por câmaras digitais. Desde então, sofreu um forte desenvolvimento, impulsionado com a introdução de algoritmos mais robustos, computadores com maior capacidade de processamento e com o surgimento das câmaras digitais de mais baixo custo.

Principalmente na última década, a técnica tem sido consistentemente investigada e utilizada como técnica experimental na caracterização do comportamento de estruturas e materiais, dadas as suas vantagens relativamente a outras técnicas experimentais, nomeadamente permitir medições dos campos de deslocamento e deformações, sem contacto, com elevada resolução, ser de fácil utilização e requerer um investimento reduzido. A aplicação desta técnica contempla medições dos campos de deslocamento e deformações no plano e no espaço à superfície, tanto em fenómenos estáticos como dinâmicos, e, mais recentemente, na medição no interior de corpos através de aplicação da técnica de correlação digital de imagem volumétrica.

Várias publicações científicas têm demonstrado a viabilidade desta técnica, ao ponto de, atualmente, ser aceite e considerada em inúmeras áreas uma ferramenta de medição experimental prática e eficaz.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema para medição dos campos de deslocamentos e deformações no plano, baseado na técnica de correlação digital de imagem.

Este envolve o desenvolvimento de um programa para calibração e alinhamento do sistema, avaliação da qualidade do *speckle* e o registo das imagens. Em simultâneo, são estudados vários processos para fabrico de padrões *speckle* necessários à aplicação desta técnica, os quais devem permitir, de forma simples, rápida e versátil fabricar padrões de alta qualidade a reduzido custo. O pós-processamento das imagens adquiridas é realizado recorrendo a programas de correlação existentes, sendo analisadas as suas capacidades e limitações, por forma a seleccionar o mais apto para o tipo de aplicações a realizar no âmbito deste trabalho. A partir de ensaios experimentais pretende-se aferir a exatidão da medição realizada com esta técnica, por comparação com valores obtidos com um extensómetro mecânico e simulações numéricas. Este trabalho deve culminar com a construção de um sistema integrado para medições de campo, que deve ser versátil, robusto e de baixo custo.

1.3 Estrutura da dissertação

Este documento encontra-se estruturado em sete capítulos, cujo conteúdo se sintetiza em seguida:

Capítulo 1 – No presente capítulo, é feita a contextualização do tema, são apresentados os objetivos do trabalho e descritos os assuntos abordados em cada um dos capítulos em que se divide este documento

Capítulo 2 – É realizada uma introdução à técnica da correlação digital de imagem, numa perspectiva global e assente numa síntese bibliográfica, que incorpora conceitos, princípios de funcionamento, etapas de implementação, aplicações, bem como vantagens e desvantagens.

Capítulo 3 – É dedicado ao desenvolvimento do programa para o ajuste dos parâmetros do sistema, avaliação da qualidade dos padrões de *speckle*, aquisição das imagens e sinal de força e deslocamento. Neste âmbito, são descritas as ferramentas implementadas, com destaque para as ferramentas de calibração da montagem e análise do padrão de *speckle*. É igualmente descrito o programa dedicado ao pré-processamento das imagens adquiridas, que permite converter imagens para diferentes formatos e ajustar a sua gama dinâmica.

Capítulo 4 – Descreve e classifica os padrões *speckle* em função da dimensão dos grãos. São identificados os requisitos necessários do padrão de *speckle* para a realização de medições com elevada precisão através da técnica. No que se refere aos padrões de *speckle* com grãos de dimensão macro, são analisados vários processos de fabrico e identificadas as suas características, com o objetivo de selecionar o mais adequado às necessidades deste trabalho.

Capítulo 5 – São avaliados os programas de processamento dedicados à técnica DIC citados na literatura, por forma a selecionar aquele que apresenta as melhores características, com relevância para a facilidade de utilização do programa, ferramentas de análise dos resultados e rapidez de processamento.

Capítulo 6 – Inicia-se com a análise e seleção da lente a ser usada no sistema dedicado ao registo das imagens para serem processadas pela técnica DIC. É descrito o processo de preparação dos provetes e o fabrico do padrão *speckle*. Os campos de deslocamentos e deformações medidos pela técnica são avaliados por comparação com os obtidos pelo extensómetro mecânico e pelas simulações numéricas, os quais permitem validar todo o sistema desenvolvido. Adicionalmente, são realizadas medições do campo de deformação produzidos por ensaios de tração na barra de Hopkinson, sendo determinada a curva tensão-deformação e que é comparada com a obtida por extensometria elétrica. A similaridade entre resultados permite, mais uma vez, validar o sistema construído e o procedimento adotado. A realização de ensaios com recurso a uma câmara de alta velocidade para recolha das imagens permitiu identificar um novo conjunto de necessidades e a definição de novos procedimentos.

Capítulo 7 – São apresentadas as conclusões gerais do presente trabalho e traçados caminhos para melhoria, desenvolvimento e investigações futuras.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Evolução histórica da técnica DIC
- 2.2 Definição e variantes da técnica DIC
- 2.3 Procedimentos de implementação
- 2.4 Aplicações
- 2.5 Conceito da correlação digital de imagem
- 2.6 Padrão *speckle*
- 2.7 Imagem digital
- 2.8 Formulação
- 2.9 Parâmetros da técnica DIC
- 2.10 Vantagens e desvantagens

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Evolução histórica da técnica DIC

No início dos anos 50 foram realizados os primeiros trabalhos na área da correlação de imagem por Gilbert Hobrough. Posteriormente, em 1961, desenvolveu um equipamento para análise de fotografias, sendo, por esse motivo, considerado como um dos pioneiros na recolha de informação por comparação de imagens [1], [2].

A introdução das câmaras digitais na década de 1970 impulsionou o desenvolvimento das técnicas de visão ótica, em especial, a correlação de imagem [3].

Embora o estudo da correlação de imagem estivesse em desenvolvimento, os métodos mais utilizados na caracterização do comportamento mecânico eram a holografia, o *speckle* laser, a interferometria laser, o método de Moiré, entre outras variantes. Porém, devido às dificuldades no pós-processamento da informação das técnicas anteriormente mencionadas, os investigadores começaram a explorar e desenvolver ferramentas para aplicação da correlação digital de imagens [3], [4].

Walter H. Peters e Walter F. Ranson foram dos primeiros investigadores a propor a determinação de deslocamentos obtidos a partir de uma imagem digital em 1982, onde sugerem que a comparação entre imagens seja efetuada em pequenas zonas de análise, sub-regiões (*subsets*), igualmente distribuídos pelas imagens, antes e após a deformação, analisando as posições de todos os *subsets* aplicados [5].

Sutton, em 1983, desenvolveu algoritmos numéricos e provou ser possível realizar medições a partir de imagens digitais. Este processo é atualmente denominado como Correlação Digital de Imagem (DIC - *Digital Image Correlation*) [6].

Moriomoto e Fujigaki, nos anos 90, introduziram a correlação digital de imagem 3D, a qual consistia na utilização de duas câmaras para determinação do campo de deslocamentos [7]. Mais tarde, Yuh J.Chao desenvolveu com sucesso um sistema de aquisição em *stereo*, automatizado para medir a propagação tridimensional de fendas [8].

Nos anos subsequentes, a técnica sofreu melhorias com a introdução de metodologias para calibração do sistema de visão e novos algoritmos para a recolha e análise de imagens, o que permitiu melhorar os resultados.

2.2 Definição e variantes da técnica DIC

A correlação digital de imagem é uma técnica de medição de campo, sem contacto e com elevada sensibilidade, que permite a medição experimental do campo de deslocamentos e deformações na superfície de uma estrutura [3], [9].

O princípio de funcionamento desta técnica assenta, essencialmente, na aquisição de imagens da superfície do objeto antes, durante e após uma solicitação, através de um

sistema constituído por: computador, câmara, elemento de formação de imagem (lente) e iluminação [10].

As imagens recolhidas são posteriormente analisadas em programas munidos com algoritmos de correlação, que comparam a distribuição de intensidade das imagens do objeto entre diferentes estados de deformação.

A técnica DIC tem vindo a ser objeto de especial interesse, tanto pela comunidade científica como empresarial, devido a um conjunto de vantagens relativamente a outras técnicas experimentais, nas quais se destacam: a simplicidade do processo, o baixo custo de implementação e a elevada robustez a perturbações externas, o que permite a sua aplicação em ambientes industriais [10].

Nas últimas décadas, os algoritmos DIC foram aprimorados por forma a melhorar a resolução e a robustez da técnica. Atualmente, a técnica DIC está dividida em três grandes categorias, dependendo do conjunto de análises e/ou medições realizadas, a saber:

Correlação digital de imagem no plano ou bidimensional (DIC-2D) é um sistema que apenas necessita de uma câmara para aquisição de imagens estando, no entanto, limitado à medição de deformações no plano e em superfícies com pequena curvatura, uma vez que, as deformações fora do plano conduzem a erros nas medições [10].

Correlação digital de imagem tridimensional (DIC-3D) é um sistema *stereo* que normalmente utiliza duas câmaras em sincronismo, embora também seja possível utilizar apenas uma câmara com um sistema de divisão de luz [11]. Ambos os métodos permitem a medição de deformações no espaço com elevada precisão, tanto em superfícies planas como em superfícies com elevada curvatura [10].

Correlação digital de imagem volumétrica (VDIC) é uma evolução da técnica DIC – 2D, permite efetuar medições de deslocamentos e deformações no interior de corpos opacos, como madeira, rocha, ossos e tecidos orgânicos, a partir da recolha de imagens internas do corpo ao longo de um qualquer eixo [3], [10].

Além das técnicas acima mencionadas, existem outras variantes, que, no entanto, por serem orientadas para aplicações muito específicas, não são aqui mencionadas. É de referir que apenas a técnica DIC-2D será posteriormente estudada, por ser aplicada no âmbito deste trabalho.

2.3 Procedimentos de implementação

A técnica DIC tem por base a análise do movimento de padrões na superfície, registando em diferentes instantes o deslocamento e/ou deformação do objeto, através de câmaras digitais. A realização das medições com esta técnica contempla as seguintes etapas:

Criação de padrões de *speckle* – Por norma, o contraste natural da superfície não é suficiente para realizar medições com esta técnica. Por esse motivo, torna-se necessário criar na superfície padrões estocásticos, designados por padrões de *speckle*, sendo que as suas características deverão ser adequadas em função de cada aplicação.

Aquisição de imagem – O registo do movimento do *speckle* é realizado através de uma ou mais câmaras digitais, sendo armazenado num computador para futuras análises. Este processo é de grande importância visto que a precisão da medição depende da qualidade do sistema de registo de imagem.

Cálculo dos deslocamentos e deformações – No sistema de correlação no plano, os deslocamentos e deformações podem ser obtidos recorrendo a programas com algoritmos, que correlacionam os padrões entre as imagens registadas nos vários estágios de deformação do objeto [3].

2.4 Aplicações

A técnica DIC possui uma grande versatilidade, o que permite ser aplicada na caracterização de propriedades em praticamente todos os tipos de materiais, assim como, no estudo de concentração de tensões, deformações, propagação de fendas, ensaios a altas temperaturas, fadiga, vibrações e estudos de danos em materiais compósitos [3]. Permite ainda realizar medições do campo de deslocamentos, velocidades e acelerações. Já na área da mecânica dos fluidos é aplicada na caracterização de escoamentos, vórtices e estudos aerodinâmicos [3].

A partir do registo de imagens com microscópio eletrónico é possível efetuar medições em escalas inferiores a um micrómetro. As aplicações podem ainda ser estendidas aos campos da medicina, do ambiente e manutenção de edifícios ou pontes.

2.5 Conceito da correlação digital de imagem

O DIC é uma técnica baseada no registo de imagens, pelo que permite realizar de forma prática medições sem contacto do campo de deslocamentos e deformações. Devido às suas vantagens, o DIC tem vindo a substituir, em certas aplicações, as técnicas clássicas como a extensometria elétrica.

Conforme já referido, a técnica DIC usa o princípio de medição na variação dos padrões superficiais entre imagens, registadas ao longo da deformação ou deslocamento do objeto. A captura e gravação destas imagens é realizada através de câmaras digitais (CCD ou CMOS), conectadas a um computador. Por forma a ser possível realizar medições com esta técnica, o objeto deve apresentar na sua superfície padrões aleatórios de intensidade. Caso a textura natural não possua um padrão adequado à medição, será necessário criar um artificialmente. A iluminação deve ser abundante, uniforme e constante. Na Figura 1 está representado um esquema da montagem experimental habitualmente usado nas medições com a técnica DIC – 2D.

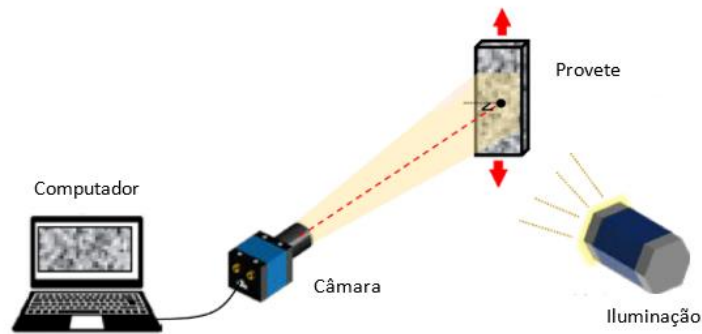


Figura 1-Esquema da montagem experimental típica para a técnica DIC-2D (adaptado de [10]).

O princípio básico da técnica DIC consiste em selecionar um ponto na imagem digital não deformada, normalmente referida como a imagem de referência, e determinar a nova posição desse mesmo ponto nas imagens seguintes.

No entanto, realizar o processo de correlação com base na intensidade de um único píxel não é possível, dado que, nas imagens existem centenas de píxeis com o mesmo valor de intensidade, o que impossibilita correlacionar a localização de um píxel entre as várias imagens. Este fenómeno é denominado por problema de abertura (*The Aperture Problem*) [3]. Além disso, esta abordagem só permite determinar deslocamentos superiores à dimensão do píxel.

Para contornar este problema, em vez de se utilizar apenas um píxel de referência, utiliza-se uma região de análise com dimensões $[m \times n]$ píxeis. Esta área é normalmente denominada por *subset*, que devido à maior quantidade de píxeis analisados e respetivo gradiente de intensidade aumenta a sua singularidade.

Contudo, mesmo recorrendo a um *subset* de grandes dimensões, a correspondência na imagem deformada não é assegurada na presença de um padrão repetitivo ou na ausência de qualquer padrão *speckle*. Este fenómeno é conhecido como o problema da correspondência e pode ser ultrapassado pela utilização de padrões aleatórios de *speckle* [3].

2.6 Padrão *speckle*

O seguimento dos padrões *speckle* da superfície do corpo, registados por uma câmara, permite à técnica DIC determinar simultaneamente os campos de deslocamentos e deformações na superfície do corpo produzidas durante uma solicitação [10].

O padrão *speckle* caracteriza-se principalmente pela dimensão dos grãos, pela sua distribuição, isotropia, contraste, adesão, estabilidade e cobertura[12].

Os grãos de *speckle* devem possuir uma dimensão adequada, sendo que grãos de maior dimensão facilitam o processo de fabrico e aplicação. Por outro lado, a utilização de

grãos de *speckle* com reduzida dimensão resulta na amplificação do ruído e favorecem o fenómeno de *aliasing* [3], [13]–[15].

Os grãos de *speckle* devem apresentar uma distribuição com elevada aleatoriedade para garantir a independência entre os padrões das sub-regiões da imagem, conseguindo, desta forma, assegurar a precisão na medição [10], [16].

Os grãos de *speckle* devem possuir uma geometria uniforme, isto é, uma isotropia próxima de um, para garantir igual sensibilidade independentemente da direção de medição [4], [17].

O gradiente de intensidades do padrão (contraste) é dependente do tipo de superfície, da textura, da distribuição e da iluminação. O contraste máximo é conseguido através da criação de grãos de *speckle* preto/branco sobre a superfície, com o ajuste do sistema de formação de imagem (focagem) e uso de iluminação abundante [10], [17], [18].

Por forma a assegurar que as variações dos padrões de *speckle* reproduzem as deformações da superfície do corpo, é requerido que este possua uma boa adesão à superfície [10].

A estabilidade geométrica e o contraste do padrão de *speckle* ao longo do processo de deformação devem ser garantidos para não comprometer o processo de medição [4].

O padrão de *speckle* deve apresentar, idealmente, uma razão de 50 % na cobertura da superfície entre grãos pretos e brancos [12], [17].

Na Figura 2 e Figura 3 são apresentados respetivamente exemplos de padrões *speckle* com propriedades adequadas e desacuadas à aplicação da técnica DIC.

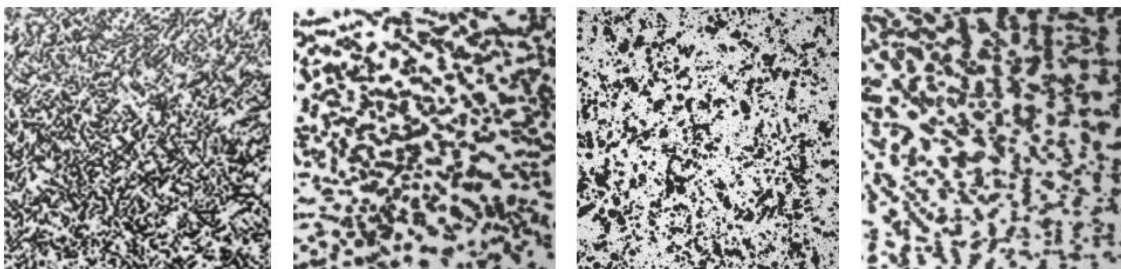


Figura 2 - Exemplos de padrões *speckle* com propriedades favoráveis (adaptado de [17]).

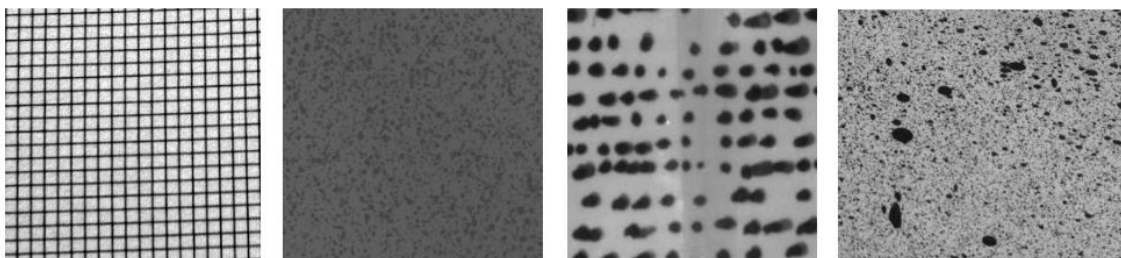


Figura 3 - Exemplos de padrões *speckle* com propriedades desfavoráveis (adaptado de [17]).

2.7 Imagem digital

Uma imagem digital consiste num conjunto finito de elementos, usualmente designados píxeis, onde, a cada píxel, está associada uma posição (x, y) e uma intensidade $F(x, y)$. Por outras palavras, uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional, na qual as coordenadas definem a posição do elemento na matriz intensidade e a função associada a cada elemento corresponde à intensidade luminosa.

Na Figura 4 é possível observar a conversão da distribuição contínua de intensidade, em valores discretos, a qual corresponde à intensidade média incidente na área de cada píxel.

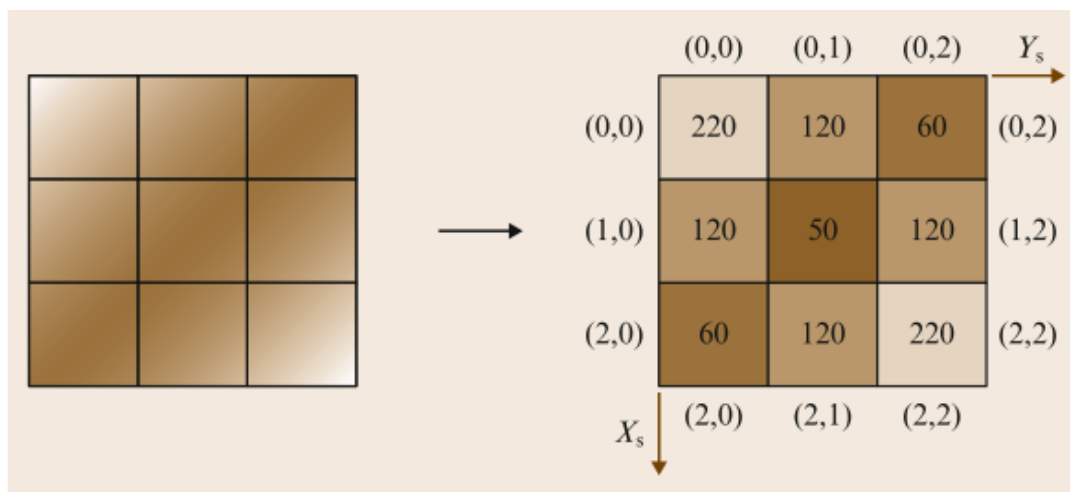


Figura 4-Esquema da conversão de intensidade contínua em discreta no sistema de captura de imagem (adaptado de [9]).

No caso particular do registo de imagens monocromáticas, a intensidade é convertida numa escala de cinzentos (*grayscale*). O intervalo de valores na escala cinza depende do conversor analógico-digital, definido pelo número de *bits*. Normalmente, este é definido numa escala de 8 bits, o que corresponde a 256 níveis de cinzento ($2^8 = 256$), numa escala linear desde o preto até ao branco [19].

No registo policromático (cores) são obtidas imagens RGB (*Red-Green-Blue*), correspondendo a três matrizes, uma por cada cor.

Como tal, a cor resultante de cada píxel é alcançada pela combinação das três matrizes intensidade, sendo assim possível definir quaisquer cores do espectro visível [19].

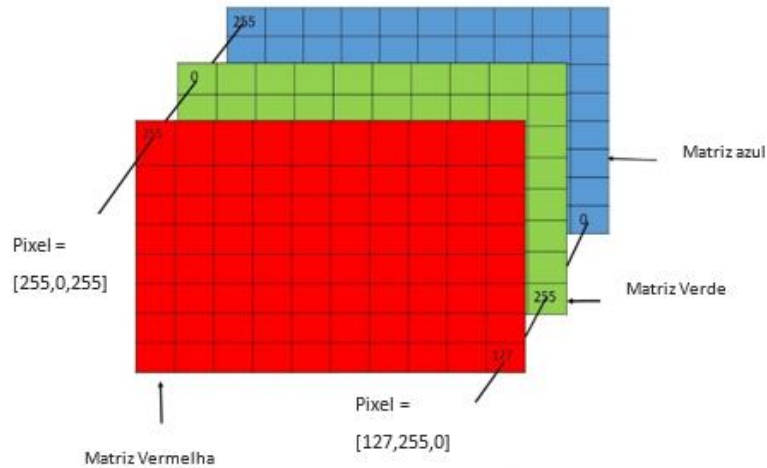


Figura 5-Esquema de matrizes das imagens RGB (adaptado de [20]).

Computacionalmente é mais prático a utilização de imagens monocromáticas pela simplificação dos cálculos de correlação. Por esta razão, os algoritmos de cálculo só aceitam imagens monocromáticas. Quando são adquiridas imagens policromáticas é necessário proceder à conversão antes de iniciar o processamento das imagens [21]. Esta conversão é o equivalente ao cálculo de luminescência, sendo a intensidade na escala monocromática calculada através da equação (1), onde a escala monocromática M é obtida das intensidades vermelha R , verde G e azul B , afetadas pelos respetivos coeficientes de conversão.

$$M = 0,299 \times R + 0,587 \times G + 0,114 \times B \quad (1)$$

É de referir que esta conversão resulta na introdução de erros na técnica DIC e perda de resolução, o que é indesejável, sendo por este motivo usadas preferencialmente câmaras monocromáticas no registo das imagens [22].

2.8 Formulação

Atualmente, existem vários algoritmos baseados na comparação e identificação da distribuição de intensidades com maior similaridade entre *subsets* de imagens distintas. A comparação entre *subsets* de intensidade é realizada com recurso à minimização ou maximização de uma função objetivo, representativa das similaridades entre *subsets*.

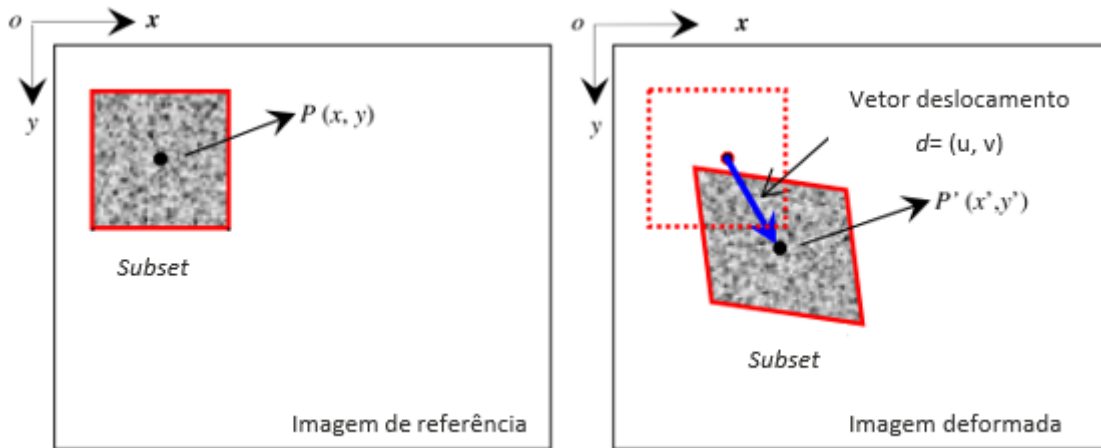


Figura 6-Representação da evolução das deformações no subset (adaptado de [16]).

Os algoritmos de correlação foram melhorados ao longo dos anos para os tornar mais robustos a fatores desfavoráveis e melhorar a precisão da técnica. A evolução destes algoritmos conduziu a que atualmente sejam usados diferentes funções objetivo, das quais se destacam a *Normalized Cross Correlation* (NCC), a *Sum of Squared Differences* (SSD), a *Zero-Mean Sum of Squared Differences* (ZSSD), a *Normalized Sum of Squared Differences* (NSSD) e a *Zero-Mean Normalised Sum of Squared Differences* (ZNSSD), sendo esta última a mais utilizada pela sua elevada robustez. Estas funções são descritas pelas seguintes expressões (2), (3), (4), (5) e (6).

$$\chi^2_{NCC}: 1 - \frac{\sum F(x, y)G(x', y')}{\sqrt{\sum F(x, y)^2 \sum G(x', y')^2}} \quad (2)$$

$$\chi^2_{SSD}: \sum (F(x, y) - G(x', y'))^2 \quad (3)$$

$$\chi^2_{ZSSD}: \sum ((G(x', y') - \bar{G}) - (F(x, y) - \bar{F}))^2 \quad (4)$$

$$\chi^2_{NSSD}: \sum \left(\frac{\sum F(x, y)G(x', y')}{\sum G(x', y')^2} G(x', y') - F(x, y) \right)^2 \quad (5)$$

$$\chi^2_{ZNSSD}: \sum \left(\left(\frac{\sum \bar{F} \bar{G}}{\sum \bar{G}^2} G(x', y') - \bar{G} \frac{\sum \bar{F} \bar{G}}{\sum \bar{G}^2} \right) - F(x, y) + \bar{F} \right)^2 \quad (6)$$

Onde $F(x, y)$ e $G(x', y')$ representam, respectivamente, o campo de intensidades antes e após a deformação, \bar{F} e \bar{G} correspondem ao respectivo valor médio. As coordenadas na imagem de referência (x, y) e no estado de deformação (x', y') estão relacionadas pelos parâmetros u e v , que representam a translação decorrida [19]:

$$x' = x + u \quad (7)$$

$$y' = y + v \quad (8)$$

A minimização ou maximização da função objetivo, χ , é alcançada quando existe uma boa correspondência entre os *subsets* das imagens entre dois estados do objeto. Contudo, durante a deformação do corpo, o *subset* pode sofrer translação, rotação e distorção, estes dois últimos dificultam significativamente o processo de correlação [3], [19]. Para contornar esta dificuldade é permitido ao *subset*, inicialmente quadrado, sofrer distorções para melhor ser correlacionado com o padrão de intensidades referente ao estado deformado do objeto. Com base nestas distorções é possível determinar as deformações ocorridas na superfície do corpo, entre dois estados, sendo as deformações no plano definidas de acordo com as equações [3], [10], [11], [13].

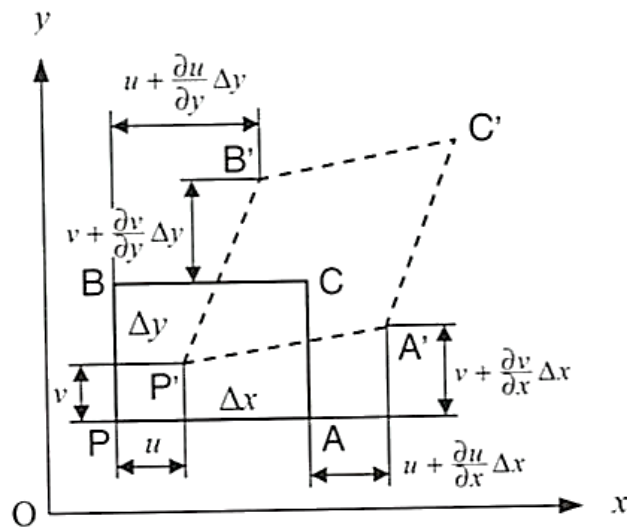


Figura 7-Componentes cartesianas da deformação no plano xy . (adaptado de [23]).

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (9)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (10)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (11)$$

2.8.1 Interpolação da intensidade

Na correlação do *subset* entre duas imagens, a grande maioria dos deslocamentos, deformações ou rotações, não correspondem a incrementos inteiros relativamente à dimensão do píxel, sendo estes tipicamente inferiores [24].

Por forma a se contabilizar movimentos e distorções inferiores à dimensão do píxel (sub-píxel), os valores discretos da intensidade em cada *subset* são convertidos numa função contínua, sendo este processo exemplificado na Figura 8 [24], [25].

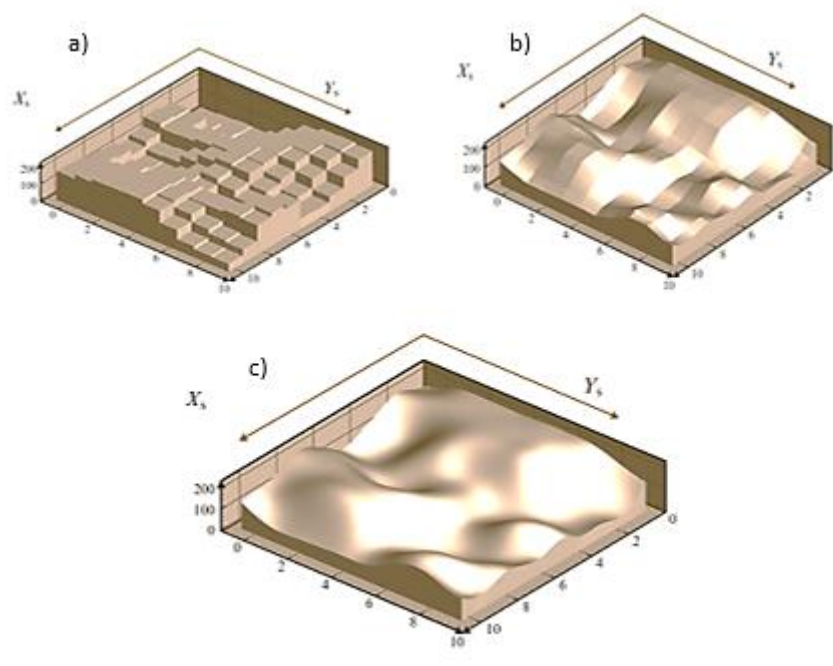


Figura 8- a) Matriz intensidade de um *subset*; b) campo de intensidade interpolada pela função *spline* bilinear; c) campo de intensidade interpolada pela função *spline* cúbica (adaptado de [24]).

Na Figura 8 a) está representado, na forma tridimensional, uma matriz intensidade do *subset*, à qual foi aproximada a uma função contínua por aplicação de funções interpolação, *spline* bilinear (b), e por aplicação de funções de interpolação *spline* cúbica (c). Deste modo, é possível determinar para cada *subset* movimentos e distorções com precisão sub-píxel, sem agravar consideravelmente o tempo de processamento.

2.8.2 Algoritmos sub-píxel

A aplicação de algoritmos de otimização na minimização ou maximização da função objetivo permitem alcançar resoluções na ordem do 0,01 da dimensão do píxel [3], [10], [25].

São vários os algoritmos de otimização referidos na literatura, destacando-se entre outros o método de Newton-Raphson e o método de Lucas-Kanade, os quais se diferenciam na precisão dos resultados e esforço computacional [3], [19], [21], [26].

2.9 Parâmetros da técnica DIC

A técnica DIC apresenta um conjunto de parâmetros aqui denominados por extrínsecos e intrínsecos. Os primeiros, são independentes ao algoritmo de cálculo e estão relacionados com todo o sistema de registo de imagem e qualidade do padrão de *speckle* gravado na superfície. Quanto aos segundos, são parâmetros internos fixos e inerentes ao algoritmo de correlação de imagem, que não podem ser alterados pelo utilizador.

O atual limite da resolução da técnica é cerca de 0,01 da dimensão do píxel, todavia, só é alcançável na presença de padrões de *speckle* com elevada qualidade, boas condições iluminação, usando sistemas de formação de imagem adequados, e com a realização de ensaios em ambientes controlados, ou seja, em condições ideais [27]. Por estes motivos, os parâmetros extrínsecos são alvo de grande preocupação na aplicação da técnica DIC, por permitirem maximizar o desempenho da técnica em cada aplicação.

Na Tabela 1 estão descritos os principais parâmetros extrínsecos com a respetiva abordagem a tomar por forma a maximizar a exatidão da técnica DIC [28], [29].

Tabela 1-Principais parâmetros extrínsecos e a sua influência na técnica DIC.

Parâmetros	Abordagem
Abertura numérica da lente	Adequado ao tempo de exposição e profundidade de campo
Alinhamento	Garantir a perpendicularidade entre o provete e câmara
Campo de visão	Dimensão adequada à região de interesse em análise
Dimensão do <i>subset</i>	Conter pelo menos 3 grãos de <i>speckle</i> e adequado em função da resolução espacial e a precisão
Distância focal	Ajustada em função da distância da câmara ao objeto
Distorção da lente	Utilizar lentes com baixa distorção.
Espaçamento entre <i>subsets</i>	Entre 20 % a 50 % da dimensão do <i>subset</i>

Gama da câmara	Deve ser igual a 1, ou seja, linear
Iluminação	Abundante e uniforme em toda a superfície
Gama dinâmica do píxel	Máxima resolução da câmara (ex.: 12 bits)
Profundidade de campo	Elevada, para garantir que a imagem permanece focada durante o ensaio
Qualidade do <i>speckle</i>	Dimensão, distribuição e contraste adequados ao ensaio
Resolução da câmara	Quanto maior, melhor
Resolução da lente	Ligeiramente superior à resolução da câmara
Ruído da câmara	Usar câmaras com elevada razão sinal-ruído (SNR)
Tempo de exposição	Adequado à resolução da medição

2.10 Vantagens e desvantagens

Como qualquer técnica de medição, a técnica DIC para medições no plano apresenta um conjunto de fatores favoráveis para determinadas aplicações, bem como constrangimentos, que podem ser impeditivos da sua aplicação em algumas situações. Na Tabela 2 estão descritas as principais características da técnica, divididas pela sua influência positiva ou negativa.

Tabela 2-Vantagens e desvantagens da técnica DIC para medições no plano.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de implementação	Elevada sensibilidade a desalinhamentos
Eficaz e eficiente	Necessita de um padrão estocástico
Grande variedade de aplicações	Requer estabilidade da montagem
Elevada robustez	Requer uma calibração
Simplicidade do processo	Limitada a medições no plano
Técnica de medição de campo	Requer iluminação abundante e uniforme
Permite medições sem contacto	Limite máximo da técnica 0,01 da dimensão do píxel

PROGRAMA DE AQUISIÇÃO

- 3.1 Descrição do programa
- 3.2 Calibração
- 3.3 Avaliação da qualidade
- 3.4 Aquisição
- 3.5 Programa de pré-processamento de dados

3 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO

3.1 Descrição do programa

Atualmente, existem inúmeros programas comerciais dedicados à correlação digital de imagem para o processamento de imagens ou vídeos previamente adquiridos. A principal vertente destes programas é possuir algoritmos rápidos e robustos para a determinação dos deslocamentos e deformações com elevada exatidão. No entanto, as ferramentas necessárias para o correto ajuste, controlo e registo de imagens ou vídeo apenas são disponibilizadas nos sistemas comerciais integrados, os quais não são de utilização gratuita.

Estas ferramentas são fundamentais para a correta aquisição das imagens, e, assim, garantir a adequada medição do campo de deslocamentos e deformações de um objeto. Por esse facto, decidiu-se desenvolver um programa na plataforma *Matlab*[®] para incorporar estas ferramentas que servem de auxílio ao ajuste do sistema de registos de imagem. O programa foi organizado de acordo com o tipo de análise a realizar, numa sequência lógica e intuitiva. O organigrama com a estrutura do programa é apresentado na Figura 9.

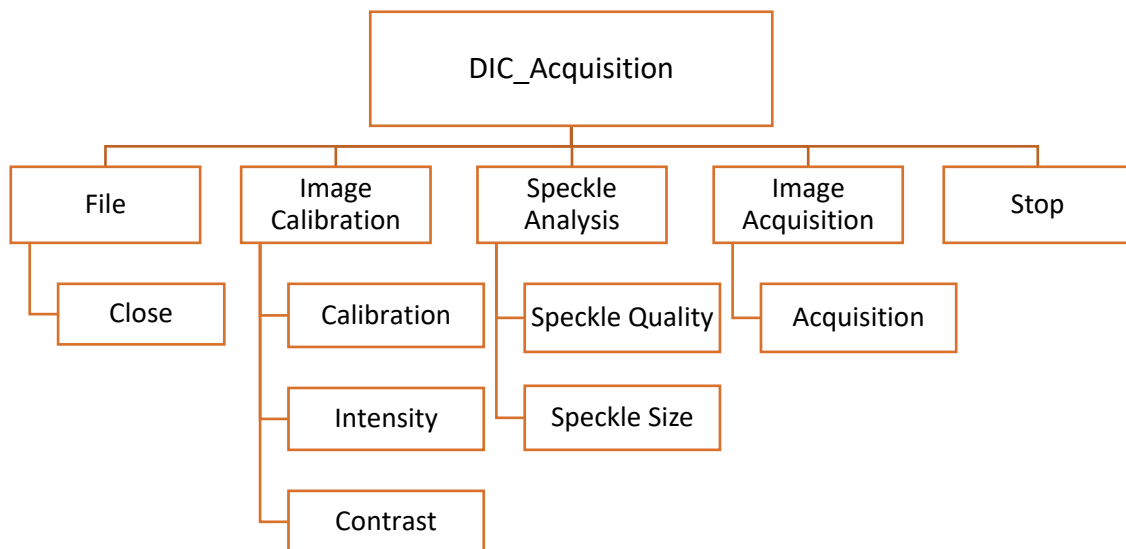


Figura 9-Estrutura do programa de calibração e aquisição de imagem.

A interface do programa apresenta no menu principal diversas operações possíveis de realizar, as quais se dividem em operações de controlo do programa e operações

dedicadas à calibração e aquisição de imagem. As operações de controlo são definidas pelos menus *File* e *Stop*.

No menu *File* é possível encerrar o programa, no qual é apresentado uma caixa de diálogo para confirmar esta intenção. O menu *Stop* tem como funcionalidade parar qualquer operação em execução, o qual deve ser sempre executado antes de dar início a outra. As operações de calibração e aquisição de imagem são executadas através dos menus *Image Calibration*, *Speckle Analysis* e *Image Acquisition*. Estas estão ordenadas da esquerda para a direita, seguindo uma sequência lógica que permitem a correta aquisição das imagens, começando com a calibração de todo o sistema, seguidamente a avaliação da qualidade do padrão *speckle* e, por fim, a aquisição das imagens. Dada a sua levada relevância para este trabalho, as diversas operações que lhe estão associadas serão seguidamente detalhadas.

3.2 Calibração

No menu *Image Calibration* são disponibilizadas as ferramentas *Calibration*, *Intensity* e *Contrast*. A ferramenta *Calibration* permite realizar o alinhamento da câmara, o ajuste da distância da câmara ao objeto (SOD), regular o campo de visão (FOV) e a focagem do padrão *speckle*.

Com o auxílio da ferramenta *Intensity* é possível realizar de forma eficaz o ajuste do sistema de iluminação de forma a se alcançar uma distribuição uniforme da intensidade em toda a superfície do objeto. Esta deve ser combinada com a regulação da abertura numérica do sistema de formação de imagem montado na câmara. O nível de contraste da imagem obtido do padrão de *speckle* pode ser analisado através da ferramenta *Contrast*. O seu nível pode ser controlado através do ajuste da lente e/ou sistema de iluminação. Esta ferramenta permite ainda avaliar a qualidade das lentes através da medição da sua resolução mediante a observação de padrão de linhas brancas e pretas com diferentes espaçamentos. O menu *Speckle Analysis* é dedicado à avaliação da qualidade do padrão de *speckle* e inclui as ferramentas *Speckle Quality* e *Speckle Size*.

A ferramenta *Speckle Quality* fornece um conjunto de parâmetros relativos à sub-região da imagem do padrão *speckle* que permitem avaliar a qualidade da sua distribuição, podendo o utilizador selecionar regiões de interesse na imagem.

A ferramenta *Speckle Size* destina-se a avaliar a dimensão do grão do padrão de *speckle*, fornecendo diversos parâmetros estatísticos sobre a imagem. A seleção da dimensão do grão é realizada através da binarização da imagem pela definição de um limiar de intensidade. Este valor é ajustado pelo utilizador mediante a observação da imagem original sobreposta pela imagem binarizada.

O menu *Image Acquisition* é dedicado à aquisição das imagens e apresenta a ferramenta *Acquisition*. Esta permite adquirir em simultâneo, a uma taxa controlada, as imagens e os sinais de força/deslocamento habitualmente fornecidos por uma máquina de ensaios de tração.

A região gráfica do programa está dividida em duas áreas, a área principal e a área secundária. A área principal permite a visualização em tempo real das imagens capturadas pela câmara. Por sua vez, a área secundária disponibiliza informação relativa à análise estatística das imagens capturadas, na forma gráfica, com o histograma de intensidades da imagem, e na forma de texto, onde são apresentados os parâmetros estatísticos mais relevantes para cada operação.

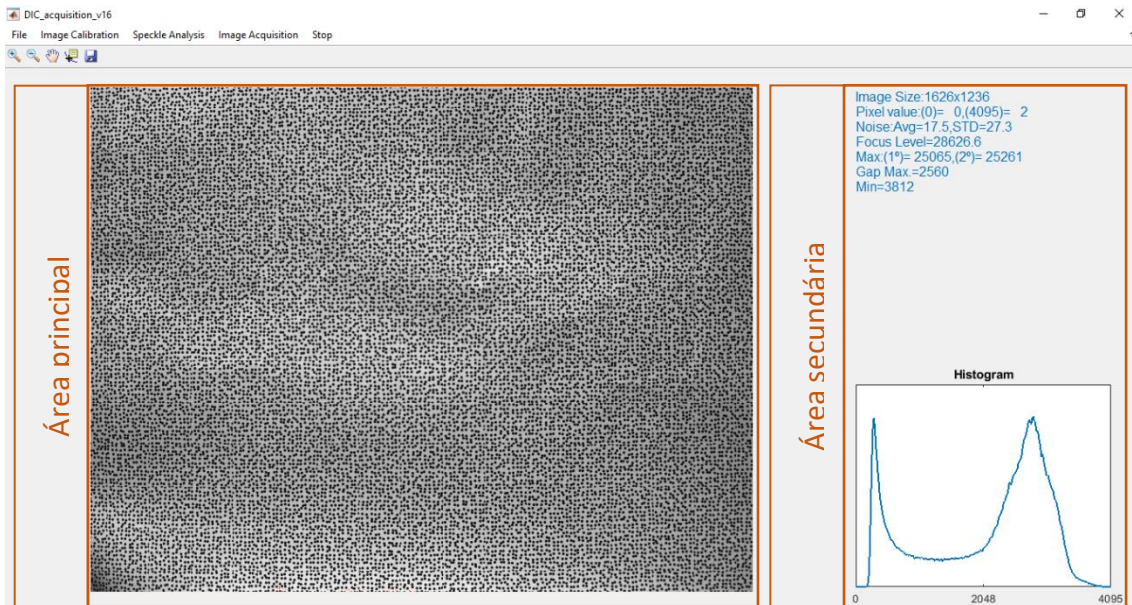


Figura 10-Interface do programa e principais regiões de análise.

As operações de calibração e alinhamento do sistema de aquisição são realizadas pela visualização do objeto na área principal e pela análise do histograma de intensidades, complementado com os parâmetros fornecidos na caixa de texto. O histograma é uma ferramenta indispensável para maximizar as condições de aquisição. De uma forma simplista, o histograma representa graficamente a distribuição do número de píxeis para cada nível de intensidade. A sua análise permite identificar e corrigir várias anomalias, das quais se destacam os seguintes:

- A concentração de píxeis com o valor máximo de intensidade é indicador de uma imagem saturada;
- A inconstância do histograma pode significar instabilidade na montagem, iluminação irregular ou pulsante;
- A análise da distribuição e da gama dinâmica do histograma permite detetar deficiências na focagem do objeto. Um histograma com a forma de sino pode indicar uma incorreta focagem devido à forte sobreposição das regiões claras com as escuras. Tal significa que existe uma pequena modelação das intensidades e, por consequência, uma menor sensibilidade da técnica;

- O perfil da distribuição dos píxeis permite aferir a qualidade do padrão de *speckle* e do nível de calibração do sistema. Idealmente, este deve apresentar uma distribuição concentrada junto às extremidades do histograma de igual amplitude, abrangendo toda a gama dinâmica. Na prática, devido às limitações do sistema de formação de imagem, o perfil do histograma deve apresentar uma geometria que se assemelha à letra “M”.

Na caixa de texto é também apresentada informação relevante para calibrar corretamente o sistema, nomeadamente, o número de píxeis com o valor máximo de intensidade, o valor médio de focagem e o valor de ruído na imagem. A leitura do número de píxeis com a intensidade máxima e a análise da distribuição de intensidades do histograma, permitem garantir que não ocorre saturação na imagem e assim evitar a perda de modelação na intensidade com a deformação do objeto. O valor da focagem é determinado com base no nível de contraste da imagem e pode ser avaliado quer globalmente quer em sub-regiões da imagem. Este poderá ser otimizado através do ajuste da iluminação, do alinhamento do sistema e do ajuste do sistema de formação da imagem (lente). Caso o valor de focagem varie substancialmente entre sub-regiões, poderá significar que a câmara não está corretamente alinhada com a superfície do objeto ou que a iluminação não é uniforme. A variação do nível de intensidade no tempo é representada pelo valor médio do ruído e desvio padrão. Este é um bom indicador para detetar a presença de perturbações externas ou instabilidades na montagem.

A qualidade da iluminação na superfície do objeto é determinante para se alcançar um bom contraste. Através da ferramenta *Intensity* é possível analisar em detalhe a distribuição de intensidades observada pelo sensor da câmara e, assim, mais facilmente efetuar correções na orientação da iluminação.

Na Figura 11 é apresentada uma imagem onde é possível identificar facilmente variações na intensidade, as quais são provocadas pela orientação e irregularidades da superfície. Algumas das funções mencionadas anteriormente continuam a estar disponíveis dentro da ferramenta *Intensity*.

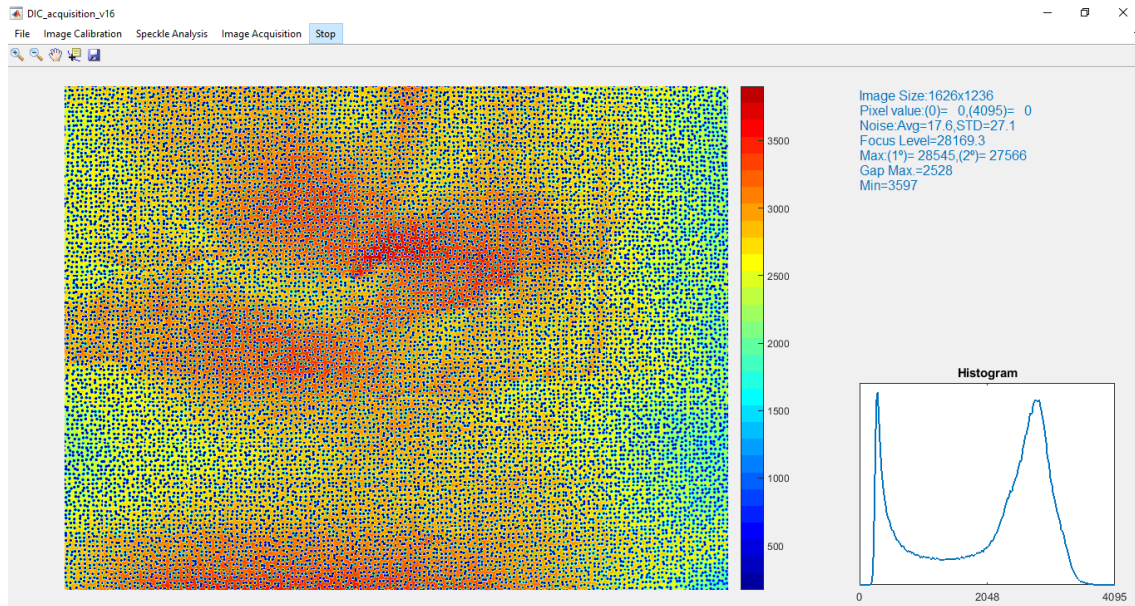


Figura 11-Interface gráfica da ferramenta para análise da intensidade.

3.3 Avaliação da qualidade

A qualidade da distribuição espacial dos grãos de *speckle* tem influência direta na precisão e detalhe das medições realizadas com a técnica DIC. Por esse motivo, é de elevado interesse possuir ferramentas que permitam avaliar a qualidade do padrão *speckle* durante o ajuste do sistema, para assim extrair a máxima qualidade da medição. No menu *Speckle Analysis* são disponibilizados três parâmetros que foram introduzidos no programa para melhor avaliar a qualidade do padrão observado, cuja informação é disponibilizada na caixa de texto da área secundária. Estes são baseados em alguns dos mais recentes trabalhos científicos publicados neste domínio:

- O parâmetro *entropy* (entropia) permite avaliar a aleatoriedade da distribuição de intensidade dos grãos de *speckle* [30];
- O parâmetro *Mean Subset Fluctuation* (MSF), representado por Sp , na expressão (12), permite analisar a flutuação do nível de intensidade relativamente a um valor médio num conjunto de 8 pontos adjacentes a um ponto central [31]. O seu valor é obtido pela seguinte expressão:

$$Sp = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 |a_{ij} - \bar{a}| \quad (12)$$

sendo \bar{a} o valor médio da intensidade no conjunto dos 9 píxeis;

- O parâmetro *Mean Intensity Gradient* (MIG), representado por δ_f na expressão (13), avalia o gradiente das intensidades nas duas direções ortogonais para uma dada dimensão [32].

$$\delta_f = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H |\nabla F(x_{ij})| / (W * H) \quad (13)$$

A distribuição do gradiente pode ser igualmente observada na área gráfica principal. Na Figura 12 observa-se a distribuição do gradiente das intensidades, na qual as regiões de maior qualidade estão representadas a vermelho.

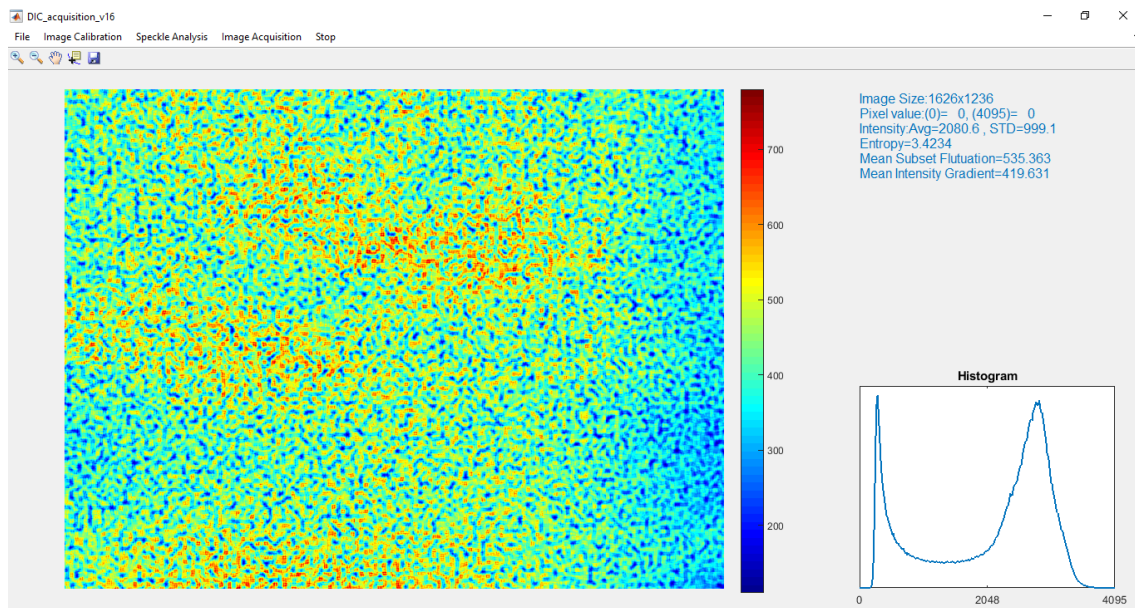


Figura 12-Interface gráfica da ferramenta para análise da qualidade do *speckle*.

A dimensão do *speckle* é um parâmetro de grande relevância para a obtenção de uma elevada resolução e boa qualidade na medição. Na diversa literatura científica é indicado que o grão de *speckle* deverá possuir uma dimensão entre 2 a 5 píxeis [13], [17], [31]. A ferramenta *Speckle Size* foi desenvolvida para determinar o diâmetro médio do grão e a sua distribuição, sendo assumido que os grãos possuem uma geometria circular. Para além da informação disponibilizada na caixa de texto sobre o diâmetro médio, desvio padrão, diâmetro mínimo, diâmetro máximo e números de grãos na imagem, a informação é também disponibilizada na forma de histograma de diâmetros para melhor percepção da sua distribuição estatística. Pelo histograma representado na Figura 13 é possível perceber que este possui uma distribuição na forma de sino.

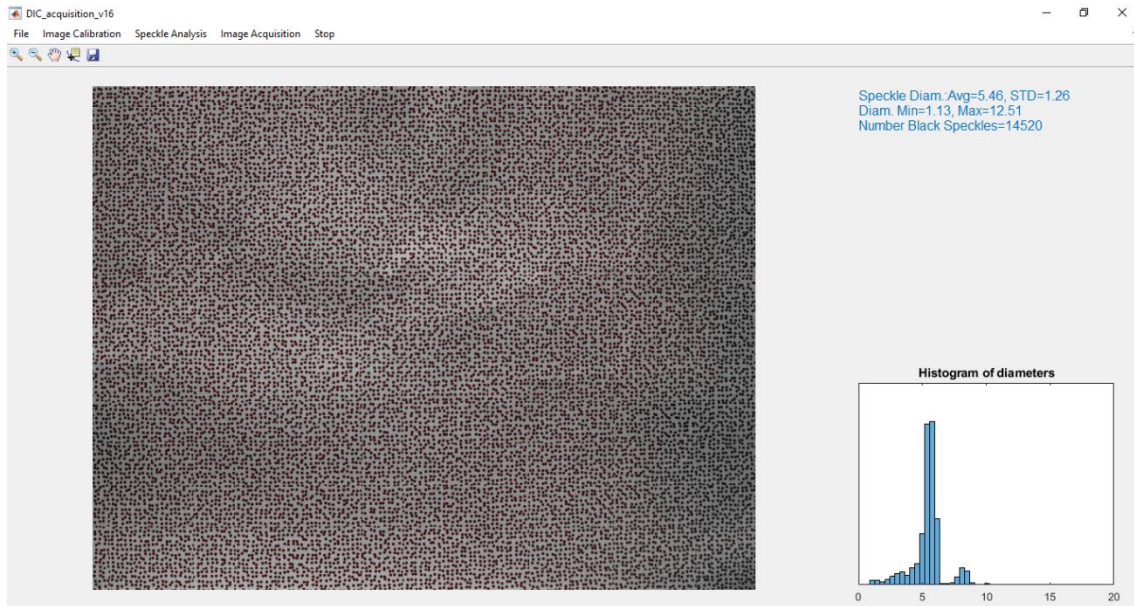


Figura 13-Interface gráfica da ferramenta de análise da dimensão do *speckle*.

3.4 Aquisição

Após os menus com as ferramentas dedicadas à calibração do sistema surge o menu *Image Acquisition*. Este possui a ferramenta *Acquisition*, a qual permite a aquisição das imagens e dos sinais de força e deslocamento a uma taxa definida pelo utilizador.

A definição da taxa de aquisição da imagem e sinais é habitualmente definida em função da taxa de deformação do objeto e do nível de resolução temporal pretendido para a medição. Por exemplo, a determinação da deformação máxima não requer grandes taxas de aquisição, em contrapartida, num ensaio de fadiga é necessário garantir uma frequência mínima, indicada pelo teorema de Nyquist-Shannon [33].

Outro parâmetro a considerar, é o deslocamento entre imagens, caso este seja demasiado elevado, a probabilidade de ocorrer descorrelação das imagens aumenta. Contrariamente, elevadas taxas de aquisição conduzem, rapidamente, a grandes quantidades de informação durante os ensaios que têm de ser guardadas e processadas [33].

A máquina de ensaios de tração utilizada neste estudo, Shimadzu modelo Autograph AG-X, tem a capacidade de fornecer externamente os valores de força e deslocamento na forma de uma tensão elétrica equivalente. Estes valores são registados no programa de aquisição por intermédio de uma placa de aquisição de sinal da *National Instruments*, modelo NI USB-9234, ligada ao computador.

Uma das mais valias desta solução é o sincronismo entre o registo das imagens e dos sinais de força e de deslocamento. Por outro lado, a máquina de ensaios tem a capacidade de registar simultaneamente a força aplicada e o deslocamento nas amarras, mas também a deformação do provete medida com extensómetros mecânicos externos.

Uma vez que a força e deslocamento são registados tanto pela máquina de ensaios como pelo programa de aquisição desenvolvido, é possível relacionar a medição da técnica DIC com a taxa de deformação medida pelos extensómetros mecânicos.

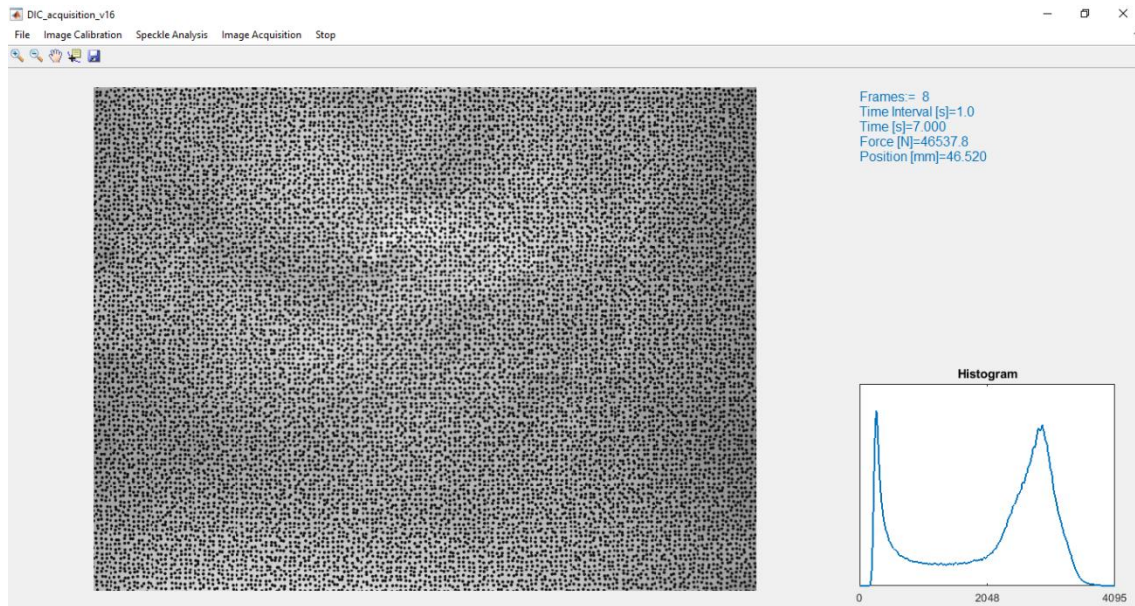


Figura 14-Interface gráfica da ferramenta para aquisição das imagens.

3.5 Programa de pré-processamento de dados

As imagens adquiridas podem ainda ser alvo de melhoria através do ajuste da sua gama dinâmica. Na prática, é extremamente difícil que a intensidade da imagem abranja toda a gama dinâmica da câmara. No caso particular da câmara digital utilizada, Basler modelo acA1600-20um, com 2 megapixéis de resolução, tem a possibilidade de adquirir as imagens com uma gama de 12 bits, o que corresponde a uma resolução de 4096 níveis de intensidade. No entanto, alguns programas de correlação apenas permitem processar imagens de 8 bits. Com a necessidade converter as imagens para uma gama dinâmica inferior, surge a possibilidade de reajustar a gama dinâmica da imagem, procurando abranger os 256 níveis. Esta solução permite melhorar a sensibilidade e a precisão da técnica, principalmente para pequenas deformações [24]. Com o propósito de permitir o fácil ajuste da gama dinâmica das intensidades e a gravação das imagens em diferentes formatos, foi desenvolvido outro programa na plataforma *Matlab*[®], cuja estrutura se apresenta na Figura 15. O seu funcionamento consiste em carregar as imagens previamente gravadas, analisar individualmente cada imagem para definir a gama dinâmica de intensidades útil e, finalmente, a conversão para 8 bits. Após a conversão, as imagens podem ser gravadas no formato mais indicado para cada tipo de programa de DIC. A separação da ferramenta de pré-processamento das ferramentas de calibração e de aquisição permite simultaneamente garantir maior estabilidade na taxa de aquisição das imagens e um pré-processamento mais rápido.

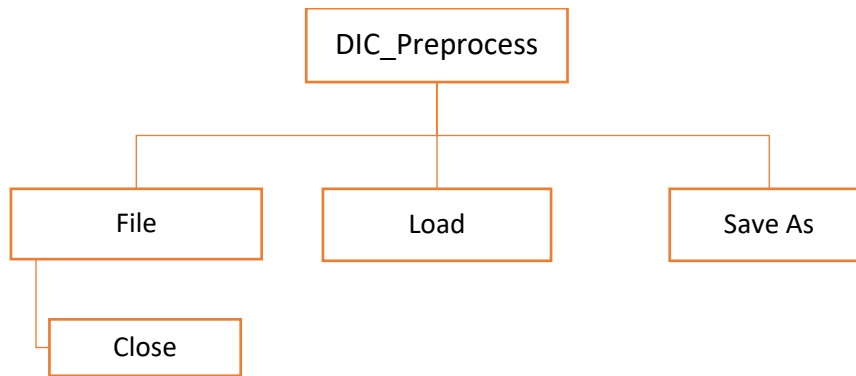


Figura 15-Estrutura do programa de pré-processamento.

Apresenta-se como exemplo, na Figura 16, o processo de conversão das imagens com gama de 12 bits para a gama de 8 bits, sendo possível verificar que a gama dinâmica de 256 níveis foi totalmente utilizada. Neste caso em particular, traduz-se numa melhoria de cerca de 12 % em relação ao processo de conversão convencional.

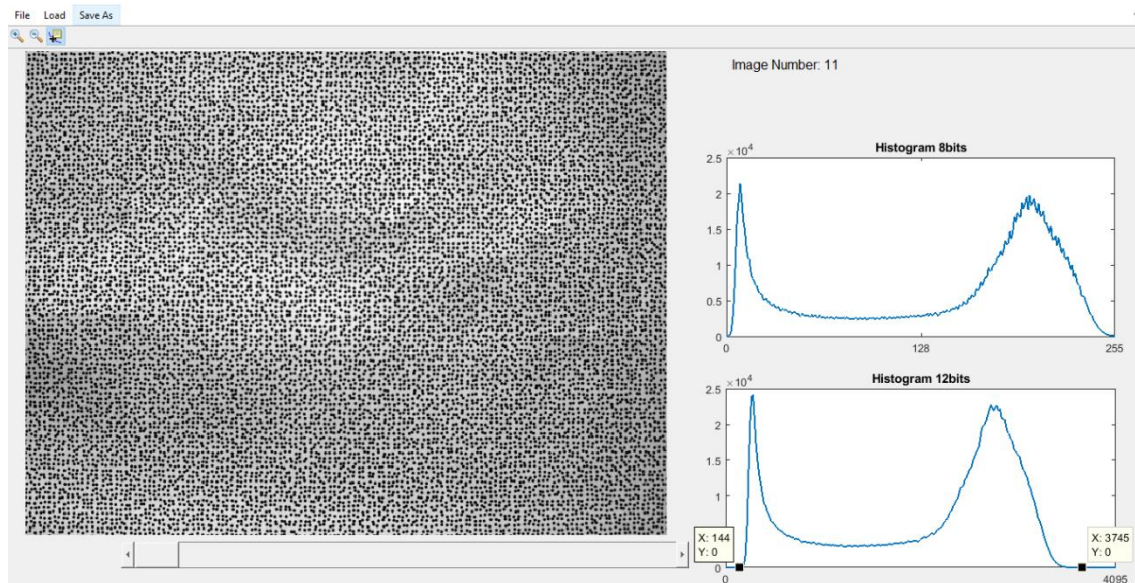


Figura 16-Interface do programa de pré-processamento e exemplo da conversão de 12 para 8 bits.

PADRÕES *SPECKLE*

- 4.1 Requisitos do padrão de *speckle*
- 4.2 Processos de fabrico dos padrões de *speckle*
- 4.3 Avaliação da qualidade dos padrões de *speckle*

4 PADRÕES SPECKLE

A grande diversidade dos processos de fabrico dos padrões de *speckle* leva à necessidade de efetuar uma estruturação e caracterização das suas propriedades, com o propósito de facilitar a seleção do processo mais adequado. O organograma ilustrado na Figura 17 apresenta uma das possíveis classificações para os processos de fabrico dos padrões *speckle*, os quais se distinguem pela dimensão dos grãos de *speckle* e pelo procedimento usado no seu fabrico [18].

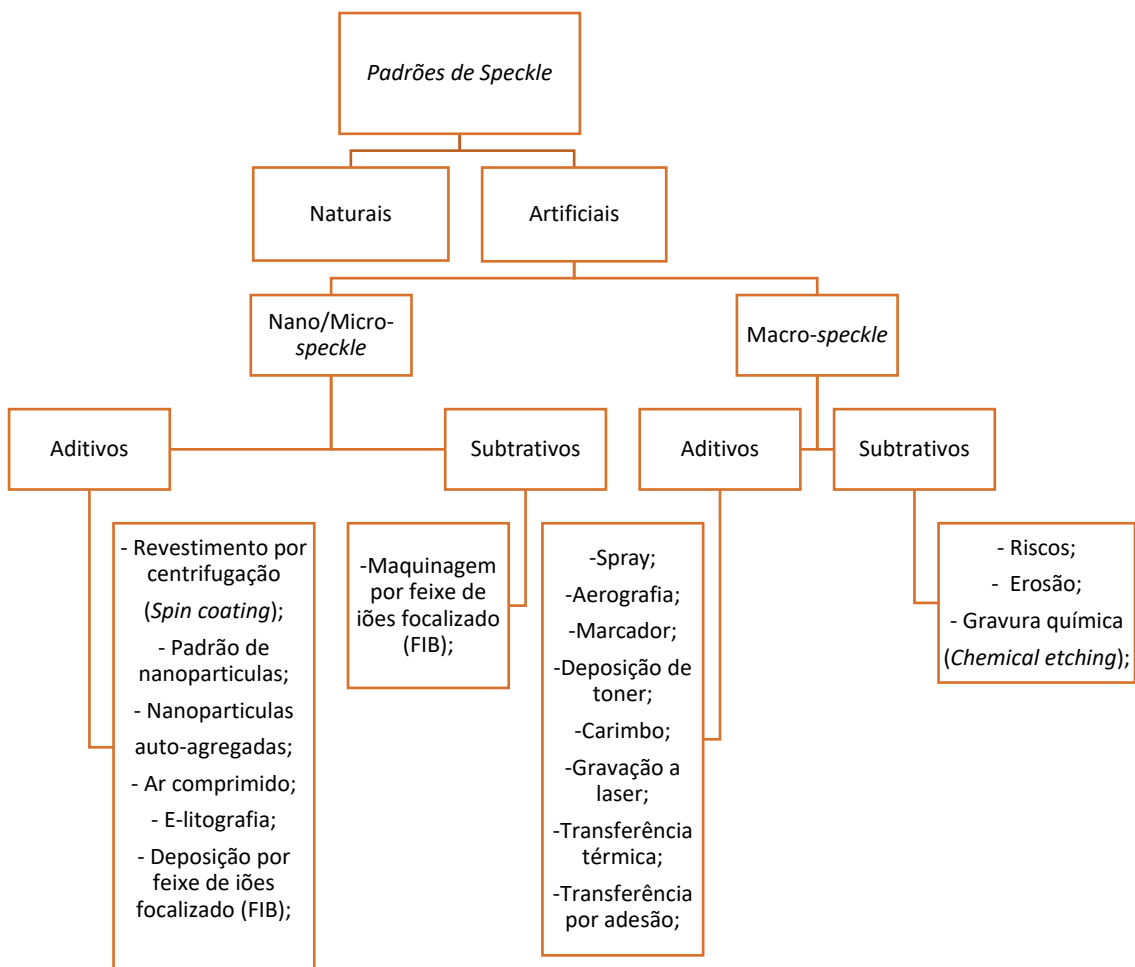


Figura 17-Organograma dos processos de fabrico dos padrões de *speckle* [18].

4.1 Requisitos do padrão de *speckle*

O padrão de *speckle* é uma componente de grande importância na aplicação da técnica DIC [18]. Por vezes, o padrão natural possui as características necessárias para que possa ser aplicada diretamente esta técnica. No entanto, na grande maioria das aplicações é recomendada a aplicação de um padrão de *speckle* artificial, com o propósito de melhorar a qualidade das imagens e consequentemente a precisão da medição. A escolha sobre o processo de fabrico depende das propriedades pretendidas para o padrão, das quais se destaca a dimensão, o contraste, a aleatoriedade, a isotropia, a razão de cobertura, a excelente adesão e a estabilidade geométrica.

4.2 Processos de fabrico dos padrões de *speckle*

Na escolha do processo para a produção do padrão de *speckle* é necessário ter em consideração alguns fatores relacionados com o grão pretendido, como o espaçamento, o grau de controlo da dimensão, a aleatoriedade e a isotropia. Adicionalmente, é necessário ter em consideração alguns aspetos relevantes na seleção do processo, a saber: a complexidade do processo, o tempo de fabrico, as condições de ensaio (temperatura, pH, exposição ambiental), os recursos necessários, a repetibilidade, a escalabilidade, e os custos do seu fabrico. Os processos de fabrico dos padrões de *speckle* artificiais são habitualmente subdivididos em nano/micro e macro de acordo com a dimensão do grão gerado.

4.2.1 Processos de fabrico nano/micro-*speckle*

Os processos classificados de nano/micro-*speckle* são todos aqueles cujo grão de *speckle* produzido detém dimensões inferiores a um micrómetro. Habitualmente, os *micro-speckle* são aplicados em análises que recorrem a equipamentos de amplificação ótica, tipicamente microscópios óticos ou eletrónicos. Características adicionais sobre os processos utilizados na produção de grãos de *speckle* de dimensão micro/nano podem ser consultadas na referência [18]. Na Figura 18 é apresentado um padrão de *speckle* constituído por grãos com apenas alguns nanómetros de dimensão.

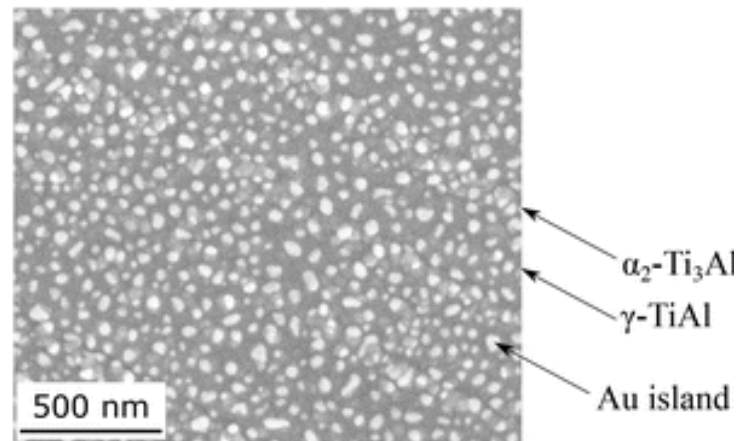


Figura 18-Padrão de *speckle* nano/micro, observado através de um microscópio eletrônico (adaptado de [34]).

4.2.2 Processos de fabrico macro-*speckle*

Os padrões de *speckle* classificados como macro são normalmente aplicados em medições que utilizem sistemas óticos correntes, possuindo tipicamente dimensões de grãos superiores a um micrómetro.

No presente trabalho, será dado destaque à análise das diferentes características dos processos de produção *com* grãos de dimensão macro, em virtude de estes possuírem a dimensão adequada à maioria das aplicações. De seguida, são descritas as técnicas de produção de padrões mais utilizados, como o Spray, Aerografia, Carimbo, Marcador, Deposição de toner, Transferência térmica, Gravação laser, Máscara e Transferência por adesão.

Spray: A pulverização de tinta spray é provavelmente o processo mais utilizado para aplicar um padrão estocástico devido à sua simplicidade, baixo custo e rapidez de aplicação.

As tintas selecionadas devem possuir um acabamento mate, para minimizar o reflexo da iluminação, assim como uma elasticidade e aderência adequada, independentemente do tipo de superfície.

O processo de fabrico resume-se à deposição de uma fina camada de tinta branca sobre a superfície do objeto, aguardar o tempo necessário de secagem e, posteriormente, a aplicação de salpicos, o mais uniformemente possível, com tinta preta. A grande desvantagem desta técnica reside no facto de não ser possível controlar a projeção da tinta preta, tanto na quantidade, como na localização e dimensão dos grãos, o que resulta num padrão irregular com grande dispersão no formato e dimensão dos grãos.

No geral, produz um padrão de qualidade razoável, conforme se pode observar pelo exemplo apresentado na Figura 19 [17], [18].

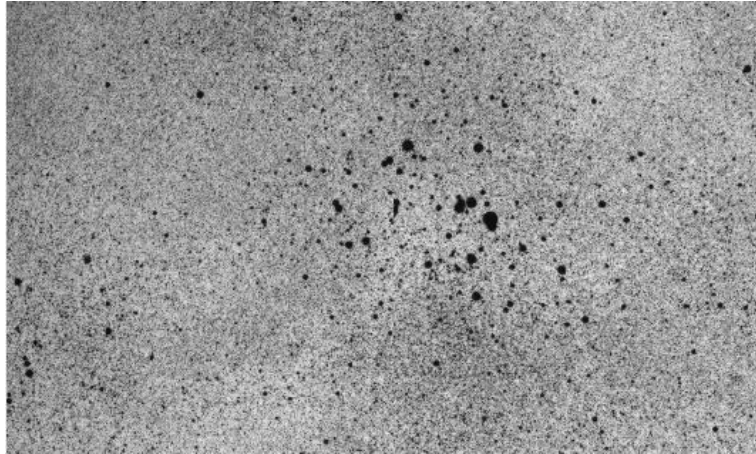


Figura 19-Padrão *speckle* criado pela técnica spray.

Aerografia: O processo de fabrico por aerografia é semelhante ao processo de pulverização de tinta em spray. No entanto, a aerografia apresenta duas variantes. Na primeira, à semelhança do spray, aplica-se uma primeira camada fina de branco e, posteriormente, a deposição de salpicos de tinta preta, ambos com acabamento mate. A aplicação com aerógrafo traduz-se num maior controlo e refinamento do padrão *speckle*, relativamente ao processo anterior. A segunda alternativa consiste na adição de partículas de toner preto à tinta branca, para numa só aplicação obter um padrão *speckle*, no qual a razão de cobertura pode ser ajustada em função da quantidade de toner adicionado. No entanto, neste método não é possível controlar a distribuição e dimensão dos grãos *speckle*, e, devido à reduzida dimensão das partículas do toner, é normalmente aplicado em pequenas superfícies. Na Figura 20 é apresentado um exemplo do padrão de *speckle* produzido pela primeira variante deste processo de fabrico.

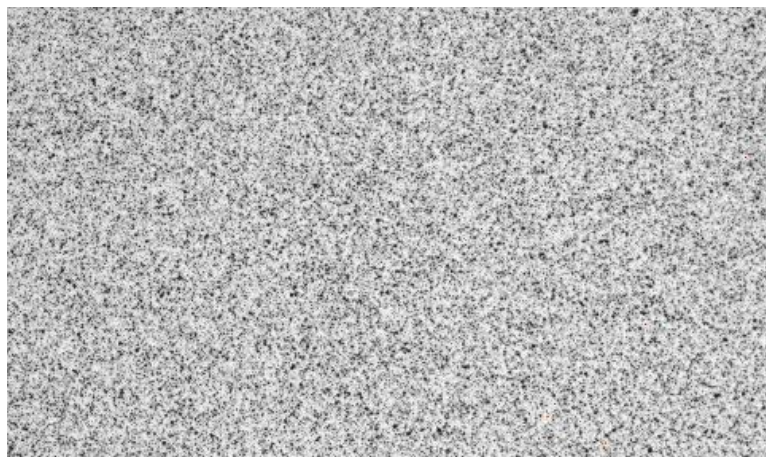


Figura 20-Padrão *speckle* produzido pelo processo de fabrico por aerografia, com deposição de tinta preta sobre a tinta branca.

Carimbo: O processo de fabrico por carimbo consiste na utilização de superfícies ou rolos com relevos, em que, durante a aplicação, apenas as saliências contactam com o objeto, depositando os pontos de tinta preta. À semelhança de outros processos, é previamente necessária a aplicação de uma camada de tinta branca. Embora o relevo superficial do carimbo possua um certo grau de aleatoriedade, o padrão estocástico final é algo repetitivo [35]. É normalmente aplicado em grandes superfícies por ser de fácil e de rápida aplicação, sendo também um processo de fabrico com custo reduzido. Contudo, este processo requer a existência de uma grande variedade de carimbos e rolos para o fabrico de grãos de *speckle* com diferentes diâmetros. Na Figura 21 apresentam-se rolos com diferentes relevos indicados para o fabrico de padrões de *speckle*, sendo estes comercializados pela empresa VIC® [36].



Figura 21-Rolos com diferentes relevos para fabrico de padrões *speckle* (adaptado de [36]).

Marcador: O processo de fabrico por marcador de tinta preta é uma excelente alternativa para aplicações em pequenas superfícies e com texturas pronunciadas. Em superfícies com tonalidades escuras é recomendado aplicar primeiro uma camada de tinta branca, de forma a aumentar o contraste. Este processo só permite produzir grãos de *speckle* com o mesmo diâmetro dos marcadores comercialmente existentes e, além disso, é fortemente dependente da destreza do operador, que tem reflexo direto na distribuição dos grãos de *speckle* e no tempo de aplicação [18]. Por outro lado, é, provavelmente, o processo de fabrico de maior simplicidade e de menor custo capaz de produzir padrões com notável qualidade. Na Figura 22 é apresentado um exemplo de um padrão produzido por este processo.

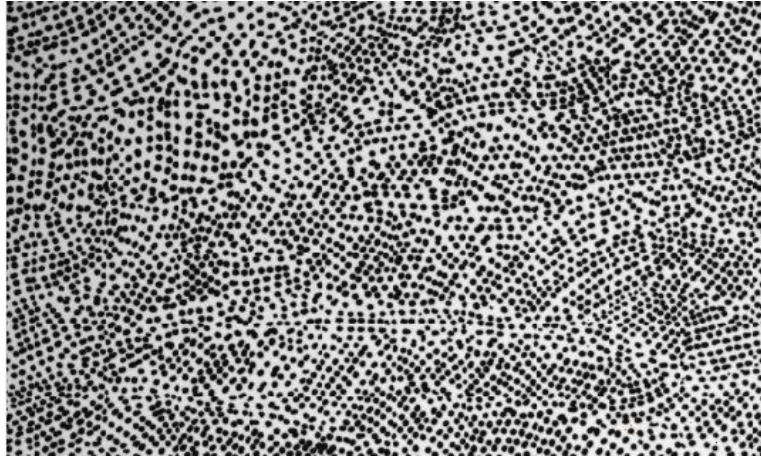


Figura 22 - Padrão *speckle* produzido pelo processo de fabrico por marcador.

Deposição de toner: O processo de fabrico por deposição de toner é normalmente usado para medição em superfícies de reduzida dimensão, onde é necessário um padrão muito refinado. O toner preto é normalmente usado para criar os grãos do padrão de *speckle* quando depositado sobre uma camada de tinta branca, uma vez que o toner branco é mais difícil de encontrar no mercado.

Os grãos podem ser criados através da distribuição do toner sobre a superfície, usando um espalhador a ar do tipo aerógrafo, ou através da queda por gravidade com um pincel agitado a uma certa distância da superfície, para permitir a dispersão das partículas de toner. A fixação dos grãos de toner é assegurada se for realizada antes da secagem da tinta branca. Em certas aplicações, as cargas estáticas são suficientes para fixar o toner, no entanto, para uma fixação permanente e duradoura, deve ser aplicada temperatura à superfície [35]. Na Figura 23 é apresentado um exemplo de um padrão de *speckle* produzido por este processo.

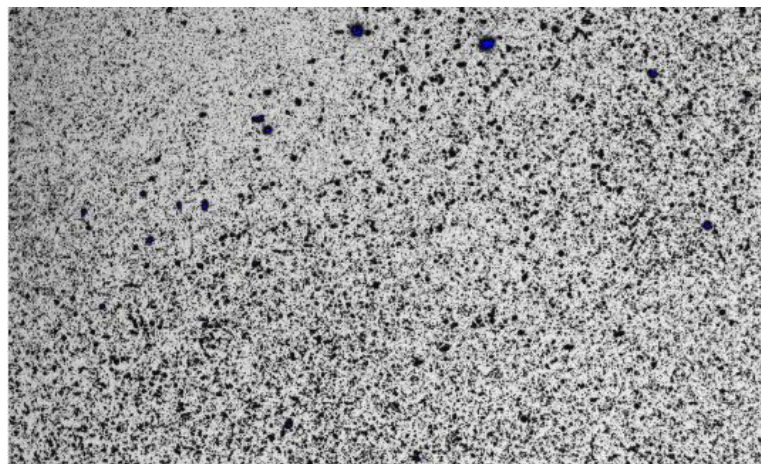


Figura 23 - Padrão *speckle* produzido pelo processo de fabrico por deposição de toner.

Transferência térmica: O processo de fabrico por transferência térmica é usado para, de uma forma controlada, criar um padrão estocástico. Habitualmente, o processo consiste na impressão de toner numa folha branca com o padrão pretendido e, posteriormente, na transferência do toner para a superfície por aplicação de pressão e temperatura. O processo de fabrico aqui usado consistiu na impressão de um padrão estocástico sobre papel fotográfico, por facilitar a transferência de toner, seguidamente, posiciona-se o papel com o padrão voltado para a superfície e com um ferro de engomar aplica-se uniformemente pressão durante o tempo necessário para o toner atingir a temperatura de fusão, entre 70 a 90 °C.

É importante durante esta fase manter o alinhamento entre o objeto e o papel para evitar borrar o toner. Uma das limitações deste processo é a impossibilidade de transferir para todos os tipos de materiais, uma vez que as temperaturas geradas podem danificar ou alterar as propriedades do objeto. No entanto, é um processo muito flexível e apresenta um baixo custo de fabrico. Na Figura 24 é apresentado um exemplo de um padrão de *speckle* produzido por este processo.

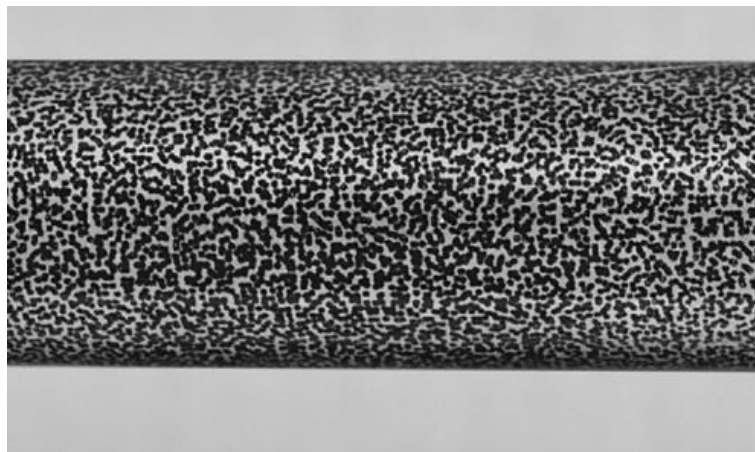


Figura 24 - Padrão *speckle* produzido pelo processo de fabrico por transferência térmica de toner (adaptado de [37]).

Gravação Laser: O processo de fabrico por gravação laser goza da grande versatilidade do processo de controlo da luz laser e permite definir uma ampla gama de parâmetros na gravação dos grãos de *speckle*, desde logo, o seu diâmetro e a sua distribuição.

As principais limitações deste processo de fabrico são o baixo contraste dos padrões *speckle* produzidos e a alteração das propriedades mecânicas devido à geração de calor durante o processo de gravação dos grãos, o que restringe a sua aplicabilidade a alguns materiais. Além disso, requer um investimento inicial considerável para a aquisição do equipamento necessário para a gravação. Na Figura 25 são apresentadas as principais etapas do processo de fabrico por gravação laser.

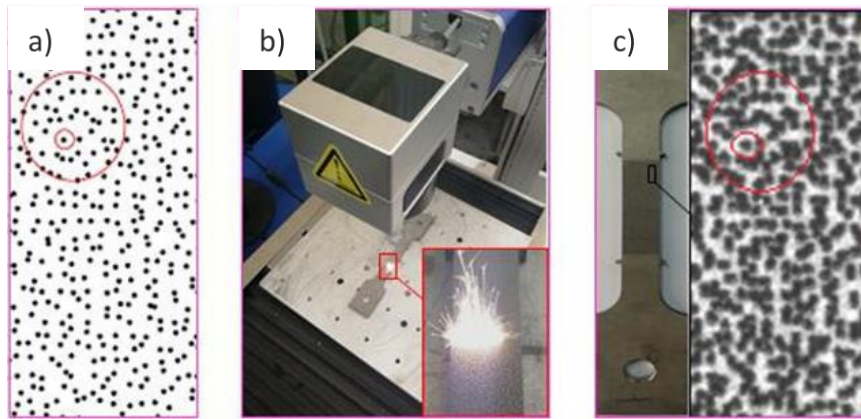


Figura 25 – O processo de fabrico dos padrões de *speckle* por gravação laser: a) padrão *speckle* gerado computacionalmente; b) equipamento de gravação laser; c) padrão *speckle* gravado num provete (adaptado de [38]).

Máscara: O processo de fabrico por máscara utiliza um elemento com furos através dos quais, é depositada tinta sobre a superfície para criar um padrão *speckle*. Para maximizar o contraste, a superfície é primeiramente pintada com tinta branca, de seguida é sobreposta a máscara e aplicada a tinta preta, que só atinge a superfície do objeto na posição dos furos, formando os grãos de *speckle*. Contudo, os furos devem possuir uma dimensão razoável para garantir a passagem da tinta. Como tal, o seu domínio de aplicação está limitado a superfícies planas e de grandes áreas de medição. É um processo de fabrico de baixo custo e de simples aplicação capaz de produzir grãos *speckle* de dimensão uniforme, porém com padrões repetitivos. O processo também apresenta uma baixa flexibilidade, isto é, o ajuste da dimensão e distribuição dos grãos de *speckle* requer o fabrico de novas máscaras, o que torna o processo mais dispendioso. Na Figura 26 é apresentado um exemplo de um padrão *speckle* produzido por este processo.



Figura 26 - Padrão *speckle* produzido pelo processo de fabrico de máscara.

Transferência por adesão: A aplicação de películas aderentes sobre superfícies para o processo de fabrico de padrões de *speckle* é bastante benéfica, visto que, permite definir o padrão com dimensões, geometria e distribuição adequadas a cada aplicação. O padrão é gerado computacionalmente e impresso na face destacável de uma das folhas, sendo posteriormente transferido para a superfície do objeto.

O processo de fabrico por adesão é recente e baseado na transferência por água (WTP) [39]. Este surgiu com o objetivo de ultrapassar algumas das limitações na aplicação do processo de transferência térmica. O processo de fabrico por adesão envolve cinco etapas, as quais são apresentadas na Figura 27. Primeiro, o padrão de *speckle* deverá ser impresso na folha fornecida, sendo necessário colocar a película com adesivo sobre o padrão. No segundo passo, é removida a película protetora e deve ser colada com o padrão voltado para a superfície do objeto, sobre a qual é necessária a aplicação de pressão uniforme para garantir a transferência total do padrão. No terceiro passo, o papel é humedecido com água para libertar o padrão do papel de transferência, o qual ocorre devido à alteração das suas propriedades de adesão. Segue-se a remoção do papel e o processo termina com a secagem do padrão transferido para a superfície do objeto.

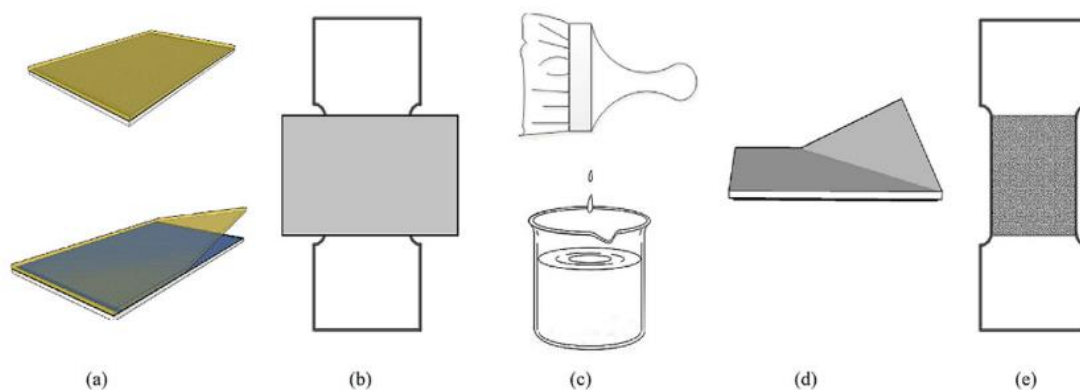


Figura 27-Principais etapas do processo de transferência por adesão [39]: a) remoção da película protetora expondo o padrão; b) colagem do padrão no proвете e pressionar; c) humedificação do papel com água; d) remoção do papel transportador do *speckle*; e) secagem do padrão *speckle*.

A principal desvantagem deste processo é o seu elevado custo, uma vez que requer a compra de folhas previamente tratadas. Baseado no mesmo princípio, foi desenvolvido neste trabalho um processo que envolve a aplicação de uma fina camada de tinta branca e a transferência por adesão de toner impresso numa folha branca de papel corrente, sendo a transferência efetuada com a aplicação de um adesivo apropriado. O adesivo deve ser aplicado uniformemente em ambas as superfícies, sobrepondo em seguida a folha sobre a superfície do objeto. Para garantir a perfeita adesão do toner é necessário pressionar a folha para retirar possíveis bolhas de ar e o excedente de adesivo. Após a cura do adesivo, o papel é humedecido e removido através de movimentos circulares com a aplicação de uma ligeira pressão. Este processo permite realizar a transferência

de qualquer tipo de padrão para variados tipos de superfície ou de materiais, de forma relativamente simples e com baixo custo. Na Figura 28 é apresentado o resultado do padrão de *speckle* produzido sobre um provete de alumínio.

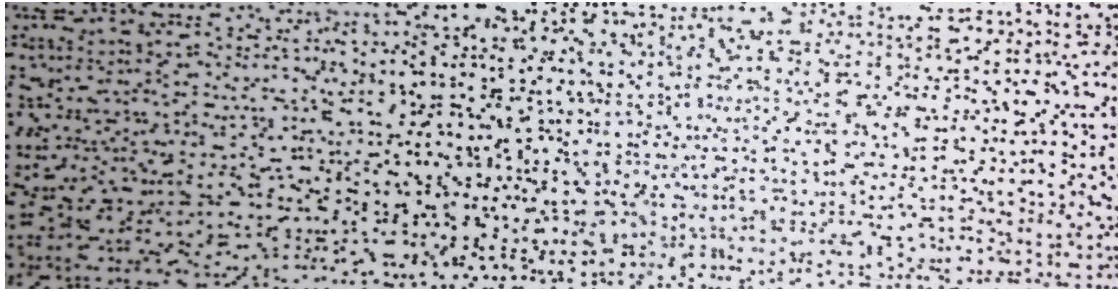


Figura 28 – Padrão *speckle* produzido pelo processo de transferência por adesão.

A análise comparativa dos processos de fabrico é realizada segundo sete características principais, classificadas de acordo com uma escala relativa de desempenho, apresentado no diagrama da Figura 29. Esta análise envolve características como: versatilidade, simplicidade, rapidez de aplicação, controlo, qualidade, escalabilidade e custo de fabrico. De entre os diferentes processos analisados, destaca-se o processo de transferência por adesão em folhas brancas de papel, pelo seu controlo, qualidade do padrão, rapidez de aplicação e baixo custo de fabrico.

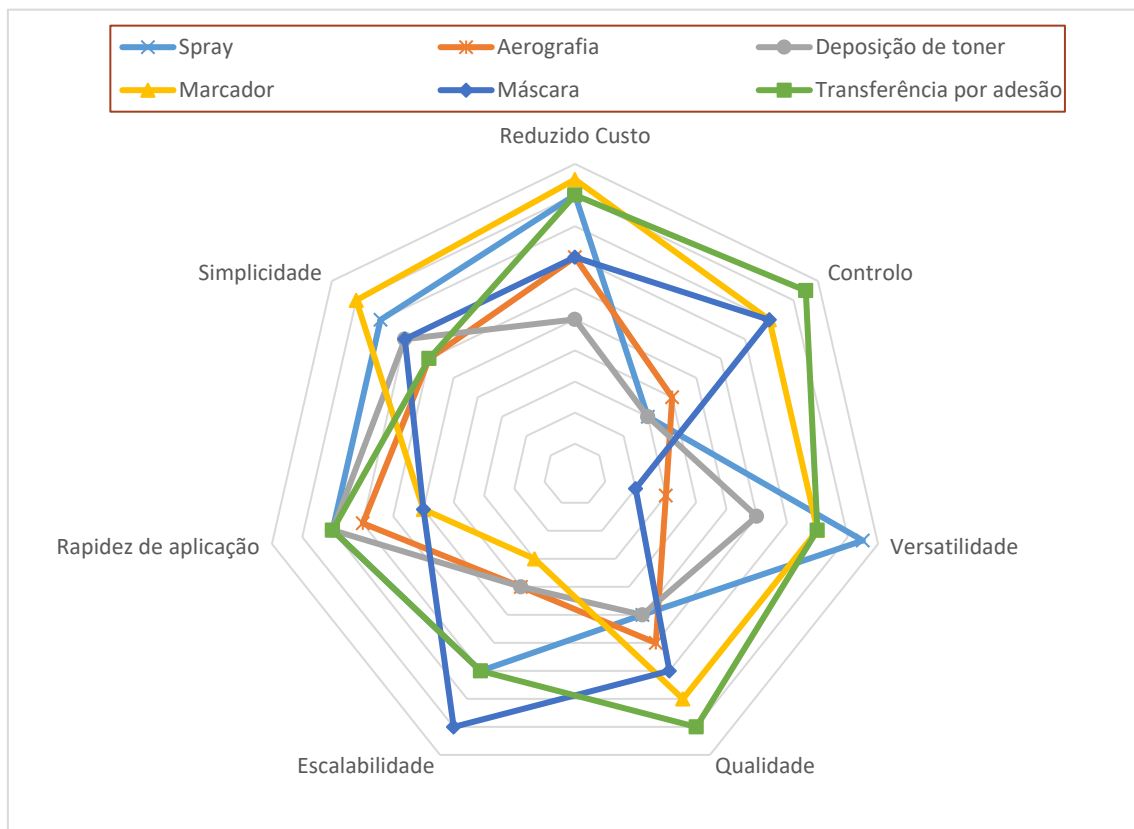


Figura 29- Classificação qualitativa das técnicas de fabrico de padrões *speckle*.

4.3 Avaliação da qualidade dos padrões de *speckle*

Devido à elevada lista de processos para fabrico de padrões *speckle* identificados anteriormente, e por forma a levar a cabo um estudo da qualidade dos padrões de *speckle* em tempo útil, decidiu-se selecionar aqueles que seriam mais relevantes para este trabalho. Assim, foram selecionados os processos de fabrico por spray, marcador, deposição de toner, aerografia, máscara e transferência por adesão.

A caracterização dos padrões de *speckle* é realizada com base nas ferramentas de avaliação incorporadas no programa de aquisição de imagens que foi descrito no capítulo anterior.

Para garantir que todos os padrões são analisados segundo as mesmas condições, estes foram produzidos em folhas brancas e utilizada a mesma montagem experimental, designadamente câmara, lente, distância, campo de visão, abertura numérica, tempo de exposição e tipo de iluminação, sendo visível a montagem utilizada na Figura 30.



Figura 30 – Montagem experimental usada na caracterização dos padrões de *speckle* produzidos por diferentes processos.

Na literatura, é estabelecido que a dimensão do grão de *speckle* deve estar compreendido entre 2 a 5 píxeis, para se obter a máxima precisão na medição. Todavia, a dimensão do *speckle* é dependente do sistema de aquisição de imagem, o qual envolve a câmara, um sistema de formação de imagem e a distância a que a câmara está do objeto (SOD). A expressão (14) permite relacionar o diâmetro do grão de *speckle* d em função dos parâmetros referidos, a qual foi desenvolvida a partir da consulta de [40],

$$d = \frac{p \times l \times n}{f_L} [m] \quad (14)$$

em que p representa a dimensão individual do píxel no sensor da câmara, l a distância até ao objeto, n é o número de píxeis que cada grão de *speckle* ocupa no sensor e f_L a distância focal da lente.

O procedimento inicia-se com a determinação da distância ao objeto, o qual é definido em função do campo de visão pretendido. Neste estudo, foi definido que este seria de 150 milímetros para a resolução máxima da câmara de 1600 píxeis, com dimensão do píxel de 4,4 micrómetros e uma lente com distância focal de 25 mm, obtendo-se assim a distância ao objeto.

$$0,150 = \frac{4,4 \times 10^{-6} \times l \times 1600}{0,025}$$

$$(\Rightarrow) l = 0,53 \text{ m}$$

Após definida a distância da câmara ao objeto e estabelecido o número de píxeis ocupado por cada grão de *speckle* (3,5 píxeis), é determinada a dimensão d do grão de *speckle* a ser aplicado na superfície do objeto.

$$d = \frac{4,4 \times 10^{-6} \times 0,53 \times 3,5}{0,025} = 0,326 \text{ mm}$$

No caso particular dos processos de fabrico por transferência, o padrão de *speckle* foi gerado usando o programa comercial *Speckle Generator*[®], da empresa *Correlated Solutions*[®], o qual permite controlar o diâmetro do grão de *speckle*, a densidade e aleatoriedade. Para este estudo foi definida a dimensão do grão em 0,33 milímetros, a densidade de 50% e a aleatoriedade de 70%, definidos relativamente ao diâmetro do grão [39]. Na Figura 31, a título ilustrativo, está representada uma imagem do padrão de *speckle*

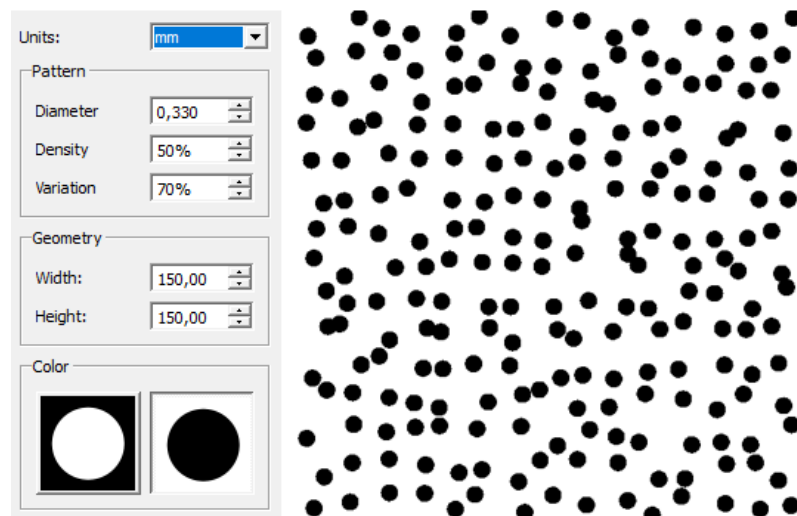


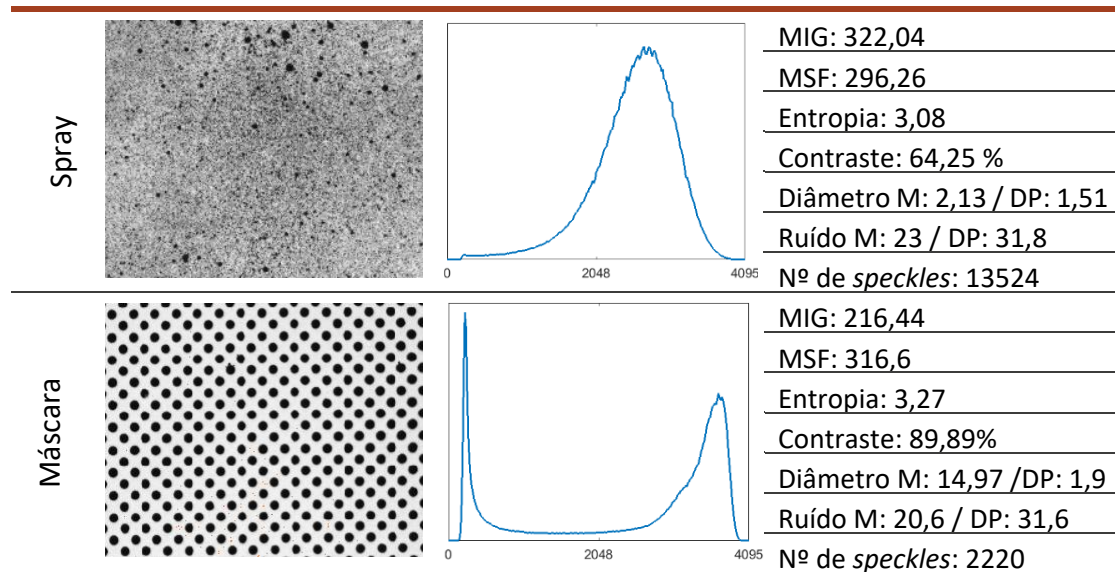
Figura 31-Geração do padrão de *speckle* usando o programa comercial *Speckle Generator*[®].

Apesar de alguns processos de fabrico serem capazes de produzir padrões *speckle* com elevada qualidade, devido ao sistema de formação de imagem introduzir distorções óticas, tal pode resultar numa perda da qualidade das imagens. Por este motivo, é importante garantir a qualidade do padrão de *speckle* a jusante do sensor da câmara. Posto isto, a caracterização dos padrões de *speckle* registados pela câmara é realizada segundo um conjunto de parâmetros, como o MIG, o MSF e a entropia, que permitem relacionar a distribuição do padrão de *speckle* com a precisão da medição.

Na Tabela 3 apresentam-se as principais características do padrão de *speckle* fabricado pelos diferentes processos de fabrico selecionados para este estudo. Para além da análise dos parâmetros geométricos, este engloba a análise da distribuição de intensidades, através da representação do histograma, a análise do contraste e dos parâmetros associados à qualidade da medição já referidos.

Tabela 3-Estudo das características dos padrões de *speckle* fabricado pelos diferentes processos de fabrico.

	Padrão de <i>speckle</i>	Histograma	Parâmetros
Transferência por adesão			MIG: 615,98 MSF: 583,208 Entropia: 3,6 Contraste: 59,26 % Diâmetro M: 3,25 / DP: 0,9 Ruído M: 19,6 / DP: 29,4 Nº de <i>speckles</i> : 39955
Marçador			MIG: 465,02 MSF: 659,1 Entropia: 3,61 Contraste: 88 % Diâmetro M: 7,81 / DP: 1,57 Ruído M: 18,3 / DP: 28,9 Nº de <i>speckles</i> : 10564
Deposição de Toner			MIG: 458,04 MSF: 459,57 Entropia: 3,5 Contraste: 62,22 % Diâmetro M: 2,78 / DP: 1,98 Ruído M: 20,6 / DP: 30,7 Nº de <i>speckles</i> : 17998
Aerografia			MIG: 382,64 MSF: 356,89 Entropia: 3,1 Contraste: 40,81 % Diâmetro M: 2,01 / DP: 0,99 Ruído M: 35,2 / DP: 39,5 Nº de <i>speckles</i> : 29010



A análise comparativa dos parâmetros obtidos para os padrões de *speckle* fabricados por diferentes processos de fabrico revela, em geral, uma grande variabilidade. No que se refere à distribuição de intensidades, representada pelo histograma, comprova-se que existe uma relação direta entre o nível de contraste e a distribuição de intensidades, que se assemelha à letra "M". Neste caso, os processos de fabrico do padrão de *speckle* através uma máscara, marcador e impressão são as preferíveis, por apresentarem maior nível de contraste.

O parâmetro entropia avalia o nível de aleatoriedade da distribuição de intensidades dos grãos de *speckle*, sendo que quanto maior for o seu valor menor é a probabilidade de ocorrer a descorrelação dos *subsets* entre imagens. Contudo, a entropia não permite fazer a distinção entre aleatoriedade ou ruído do padrão *speckle*. Posto isto, o parâmetro MIG revela ser de distinta relevância para avaliar de forma assertiva a qualidade do padrão de *speckle* [10], [18], [39]. No entanto, este parâmetro não toma em consideração a aleatoriedade global do *speckle* [39], pelo que, deve ser avaliado em conjunto com o nível de entropia do padrão.

Pela análise descrita, o processo de fabrico de transferência por adesão é o preferível, por apresentar o maior valor de MIG e permitir um maior controlo da dimensão, densidade e distribuição dos grãos de *speckle*.

Apesar dos processos de fabrico dos padrões de *speckle* serem produzidos com o mesmo tipo de papel e os ensaios serem realizados nas mesmas condições, observam-se distintos níveis de contraste nas imagens.

Isto pode ser explicado pelo tipo de tinta preta usado em cada processo, sendo que no caso de técnica de fabrico por marcador, a tinta é capaz de absorver um espectro mais amplo de comprimentos de onda da luz, o que se traduz em pretos mais profundos e num contraste superior.

PROGRAMAS DE CORRELAÇÃO

- 5.1 Critérios de análise
- 5.2 Análise comparativa

5 PROGRAMAS DE CORRELAÇÃO

Os campos de deslocamentos e deformações podem ser determinados experimentalmente pela aplicação de algoritmos de correlação digital de imagem entre imagem capturadas da superfície do objeto durante a aplicação de solicitações externas [3], [10].

Atualmente, existem empresas que disponibilizam programas comerciais, como *Avizo*[®], *Correlated Solutions*[®], *GOM*[®], *CorreliSTC*[®], *Image Systems*[®], *Imetrum*[®], *LaVision*[®], *MatchID*[®], *EikoSim*[®], entre outras. Destas, apenas a empresa *GOM*[®] tem disponível uma versão gratuita para correlação digital de imagem, o *GOM Correlate*, o qual somente permite determinar o campo de deslocamentos e de deformação no plano (DIC-2D).

Para além destes, estão também disponíveis programas não comerciais, gratuitos, tipicamente desenvolvidos em projetos académicos, sendo os mais conhecidos *Ncorr*, *Digital Image Correlation Engine (DICE)*, *Opticist* e *YADICS*.

Para a realização de um estudo comparativo das capacidades e desempenhos dos programas de correlação digital de imagem, foram selecionados o *GOM Correlate*, o *Correlated Solutions*[®] (VIC-2D), o *DICE*, o *Ncorr*, e o *Opticist-Moiré*. Esta seleção teve por base a consulta de fóruns de especialidade, publicações científicas e da associação internacional da Correlação de Imagem (*iDICS- International Digital Image Correlation Society*)[41], [42].

5.1 Critérios de análise

O objetivo primordial desta análise é identificar as principais características dos diferentes programas de correlação de imagem selecionados. Este envolve a análise descritiva dos programas segundo o seguinte um conjunto de características:

- Procedimento de instalação;
- Formato e capacidade de processamento de imagens;
- Funcionalidades;
- Tempo de processamento;
- Análise e extração de resultados;
- Outras funcionalidades.

5.1.1 *GOM Correlate*

A *GOM*[®] é uma empresa internacional com sede na Alemanha que desenvolve, produz e distribui programas, máquinas e sistemas dedicados à medição de coordenadas a três dimensões, Figura 32. Esta garante suporte técnico, promove investigação e partilha de conhecimento através da utilização gratuita do programa *GOM Correlate 2D*.

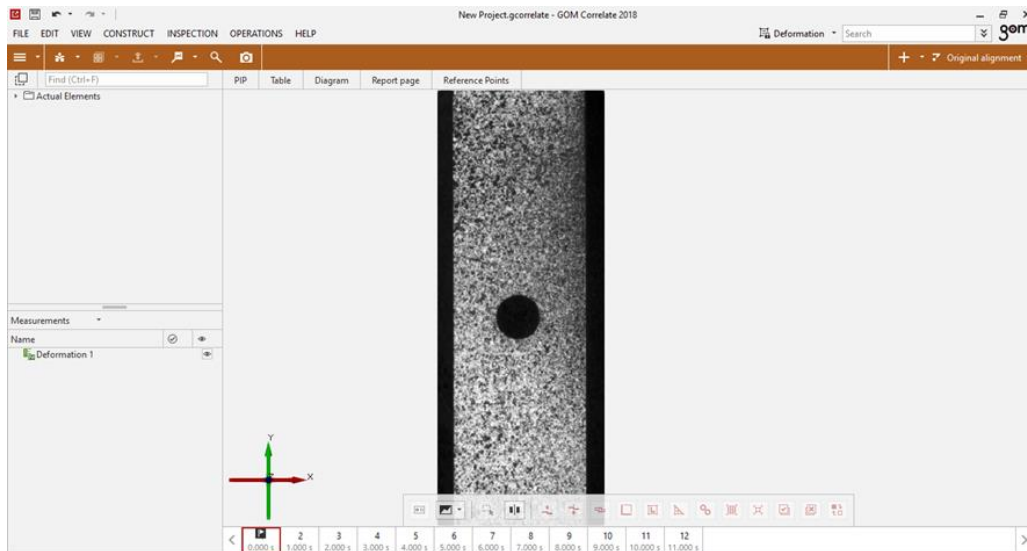


Figura 32 - Interface de trabalho do *GOM Correlate 2D*.

- Procedimento de instalação:

A instalação do *GOM Correlate* é relativamente simples, sendo apenas necessário descarregar o programa da página de *internet* da empresa *GOM*[®] [21], após preencher um formulário com dados do utilizador, e executar o instalador.

- Formato e capacidade de processamento de imagens:

O *GOM Correlate* permite carregar vários formatos de ficheiros imagem em 8 bits, que podem ser monocromáticas ou a cores, tendo como único requisito o nome dos ficheiros possuírem uma terminação sequencial numérica.

- Funcionalidades:

O programa apresenta uma elevada funcionalidade e está bem estruturado, pois, disponibiliza um largo número de ferramentas. O processo de aprendizagem é facilitado através de tutoriais em vídeo disponibilizados pela empresa. Para além disto, possui ferramentas que permitem, entre muitos outros, definir a zona de interesse (ROI – *Region of interest*), a dimensão do *subset*, o nível de precisão da análise e a qualidade do padrão do *speckle*.

- Tempo de processamento:

O tempo de processamento depende, principalmente, do número de imagens, dimensão e espaçamento dos *subsets*, precisão da análise e capacidade de processamento do computador. Neste estudo, o tempo de processamento de 46 imagens, com uma resolução de 1625×351 , foi de 33 segundos.

- Análise e extração de resultados:

Este programa possui uma ampla gama de ferramentas para a análise de resultados, em que se destacam o campo de deslocamentos, deformações, velocidades e acelerações, com a possibilidade de realizar análises locais através da definição de elementos virtuais, tais como extensómetros virtuais e secções de análise. Permite também gerar automaticamente relatórios, com os resultados na forma de gráficos, imagens e vídeos. A partir dos gráficos gerados é possível exportar o seu conteúdo no formato texto, o que permite ser processado por outras ferramentas de cálculo.

- Outras funcionalidades:

O programa possui a ferramenta de ajuda, com a descrição sumária das suas funcionalidades e sua relevância para o processo de cálculo.

Neste programa, destaca-se a ferramenta que permite avaliar a qualidade do padrão *speckle* para cada *subset*, o que se torna útil para se obter resultados de elevada qualidade.

5.1.2 *Ncorr*

O *NCorr* é um programa de correlação digital de imagem para aplicações 2D. Desenvolvido na plataforma *MatLab*[®], possui uma interface bastante intuitiva, ver Figura 33, e permite customizar os procedimentos de cálculo, por possuir o código em fonte aberta [43].

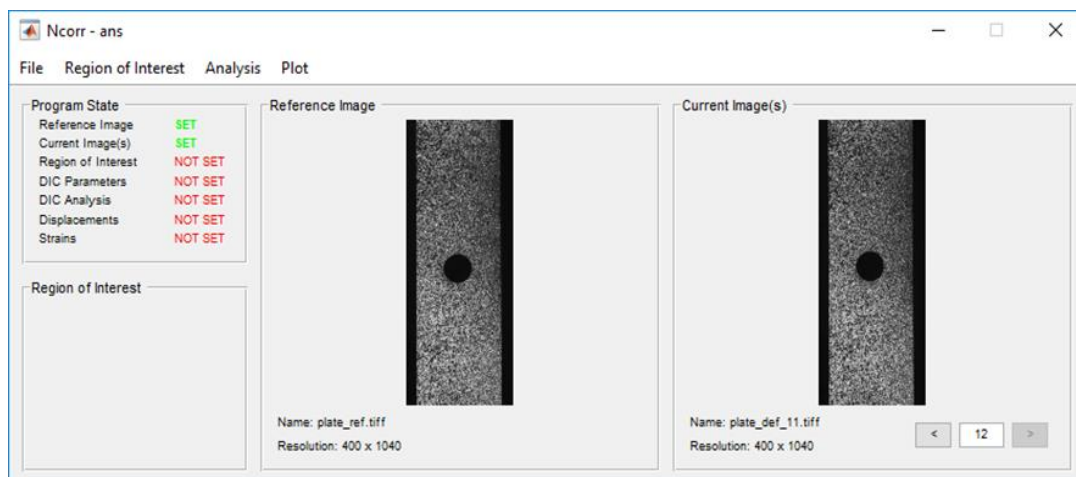


Figura 33 - Interface de trabalho do programa *Ncorr*.

- Procedimento de instalação:

A instalação do *Ncorr* requer a prévia instalação de um compilador de C++ (Min-GW) reconhecido pelo *MatLab*[®]. Informações mais detalhadas sobre o procedimento são fornecidas no manual de instalação [44].

- Formato e capacidade de processamento de imagens:

Este programa permite tratar imagens em diferentes formatos (8, 12 e 16 bits), que podem ser monocromáticas ou a cores. Requer o carregamento em separado da imagem de referência, e, posteriormente, as restantes imagens, devendo estas apresentar uma numeração sequencial.

- Funcionalidades:

O programa apresenta uma interface simples clara e bem estruturada, o que permite um rápido processo de aprendizagem. Para além disto, é fornecido um manual de utilização, que, de uma forma sumária, descreve o procedimento de utilização [45].

Através da informação disponibilizada numa barra lateral do programa, ver Figura 33, o utilizador é informado das etapas de processamento realizadas e os passos necessários para a sua conclusão.

Para cada fase do processo existem menus com várias opções de análise, como por exemplo, a dimensão de interesse (ROI) e a dimensão do *subset*. Os manuais e vídeos exemplificativos da utilização deste programa podem ser encontrados na página da internet [44].

- Tempo de processamento:

Com o objetivo de comparar o tempo de processamento entre programas, procedeu-se à análise utilizando os mesmo parâmetros e imagens, tendo sido obtido um tempo próximo de 230 segundos.

- Análise e extração de resultados:

O programa disponibiliza as principais ferramentas para análise dos resultados, nomeadamente, campo de deslocamentos, deformações, extensómetros virtuais e secções. No entanto, é necessário recorrer a dois subprogramas externos para realizar o pós-processamento dos resultados e extrair a informação de extensómetros virtuais ou de secções de análise. Infelizmente, estes apresentam algumas falhas na programação, condicionando o seu normal funcionamento.

- Outras funcionalidades:

O programa possui ferramentas que permitem corrigir as distorções óticas na direção radial produzidas pelo sistema de formação de imagem, o que se pode traduzir numa melhoria dos resultados quando são usados sistemas de aquisição de baixa qualidade.

5.1.3 VIC-2D

O *VIC-2D* é um programa comercial para correlação de imagem, desenvolvido pela empresa *Correlated Solutions*[®], sendo dos mais reconhecidos e utilizados pela comunidade científica [46]. À semelhança de outros programas comerciais, disponibiliza uma versão gratuita por tempo limitado, cuja interface é apresentada Figura 34.



Figura 34 - Interface de trabalho do programa VIC-2D (adaptado de [46]).

- Procedimento de instalação:

A instalação do programa é realizada a partir de um executável descarregado diretamente da página da *Correlated Solutions*[®], sendo gerado um número de identificação após a sua instalação, o qual deverá ser enviado para a *Correlated Solutions*[®] de maneira a obter uma licença temporária, habitualmente de 30 dias.

- Formato e capacidade de processamento de imagens:

O VIC-2D permite processar imagens e vídeos gravados em vários formatos. No caso das imagens, estas devem ser monocromáticas e numeradas sequencialmente segundo a seguinte formatação (001, 002, 003, etc...).

- Funcionalidades:

O ambiente de trabalho do programa apresenta uma estrutura simples, o que facilita a sua utilização. Por este motivo, o processo de aprendizagem é fácil e rápido, assim como o domínio das ferramentas disponibilizadas. Para um conhecimento mais aprofundado é disponibilizado um manual de utilização.

O processamento dos dados envolve a definição da região de análise (ROI), dimensão do *subset* e espaçamento, tipo de interpolação, função objetivo, precisão da análise, entre outros.

- Tempo de processamento:

O tempo de processamento das 46 imagens foi de apenas 17 segundos, sendo o menor tempo de todos os programas aqui analisados.

- Análise e extração de resultados:

O programa contém as ferramentas *standard* de análise dos resultados, as quais permitem extrair os campos de deslocamentos, deformações e avaliar os resultados em diferentes pontos e diferentes regiões, através da criação de extensómetros virtuais. É também possível gerar gráficos a partir dos resultados, os quais podem ser exportados nos formatos de imagem e vídeo.

- Outras funcionalidades:

Este programa destaca-se por possuir ferramentas que permitem compensar os movimentos de corpo rígido e corrigir as distorções óticas produzidas pelas lentes, o qual requer a realização de uma calibração prévia do sistema.

5.1.4 *DICe*

O *Digital Image Correlation engine (DICe)* é um programa de utilização livre vocacionado para a correlação digital de imagens *adquiridas* com uma ou duas câmaras, o que permite realizar medições de campo a duas e três dimensões.

Apesar do programa utilizar os algoritmos *standard* de correlação de imagem, este diferencia-se dos restantes pelo facto de também permitir utilizar outros algoritmos de correlação, com a vantagem de permitir definir *subsets* com geometrias arbitrárias em imagens de baixo contraste [47]. A interface do programa *DICe* é apresentada na Figura 35, com destaque para a informação sobre as imagens a processar apresentada no lado esquerdo, os parâmetros de processamento no lado direito e as imagens com o padrão de *speckle* na região central.

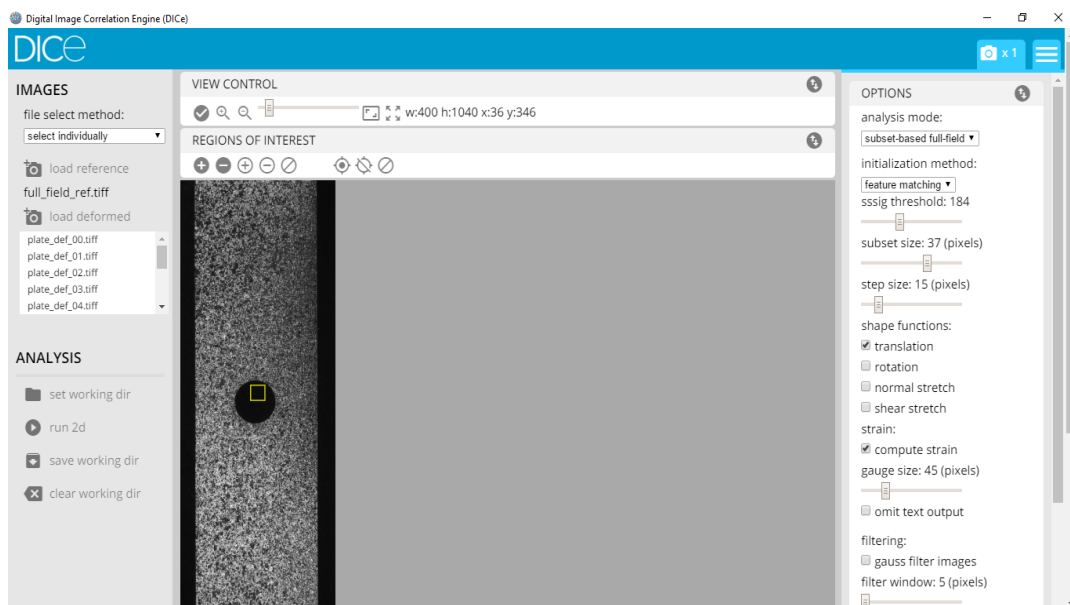


Figura 35- Interface de trabalho do programa *DICe*.

- Procedimento de instalação:

A instalação do programa *DICe* é realizada a partir do ficheiro executável descarregado da página *Github* [48]. Infelizmente, o *DICe* apenas permite calcular o campo de deslocamentos e deformações, não dispondo da capacidade de apresentação dos resultados processados. Este terá de ser realizado com recurso a um programa externo.

- Formato e capacidade de processamento de imagens:

O programa *DICe* permite analisar imagens monocromáticas ou a cores no formato de 8, 12 e 16 bits, devendo a imagem de referência ser separada das imagens deformadas e estas apresentarem uma numeração sequencial, à semelhança da maioria dos restantes programas.

- Funcionalidades:

Como o programa é apenas dedicado ao processamento das imagens e não possui ferramentas para a visualização dos resultados, este contém um menor número de opções e de menus relativamente aos outros programas, o que se traduz numa maior facilidade de utilização.

Para realizar uma análise é necessário definir o ROI, a dimensão do *subset* e respetivo espaçamento, o modo de análise, e as funções de forma. Este possui ferramentas para a filtragem das imagens, com a finalidade de suavizar as transições de intensidades e, assim, melhorar os resultados.

- Tempo de processamento:

O procedimento de processamento das imagens foi idêntico ao descrito nos programas anterior, sendo o tempo de processamento registado com o programa *DICe* de 480 segundos, representando o maior tempo de entre os programas analisados.

- Análise e extração de resultados:

Apesar do programa ser de simples utilização, este tem a desvantagem de não dispor de ferramentas para visualização e análise dos resultados, o que obriga a, posteriormente, terem de ser processados num programa externo. O programa *ParaView* é recomendado para a visualização e extração dos resultados, mas, por ser um programa de visualização generalista, aumenta a complexidade de utilização.

- Outras Funcionalidades:

Para além da análise dos campos de deslocamentos e deformações, o programa dispõe de ferramentas que permitem seguir marcadores com movimento no plano e no espaço, caso sejam usadas uma ou duas câmaras respetivamente.

5.1.5 *Opticist-Moiré*

O programa *Opticist-Moiré* foi desenvolvido por Zhaoyang Wang e Hieu Nguyen para realizar análise das imagens, previamente adquiridas com uma só câmara, pela técnica de *Moiré* e pela técnica de correlação. Como é um programa inicialmente desenvolvido para a técnica de *Moiré*, no qual foi, posteriormente, incluída a técnica DIC, só permite tratar duas imagens em simultâneo, sendo estas apresentadas lado a lado, conforme se pode observar na Figura 36.

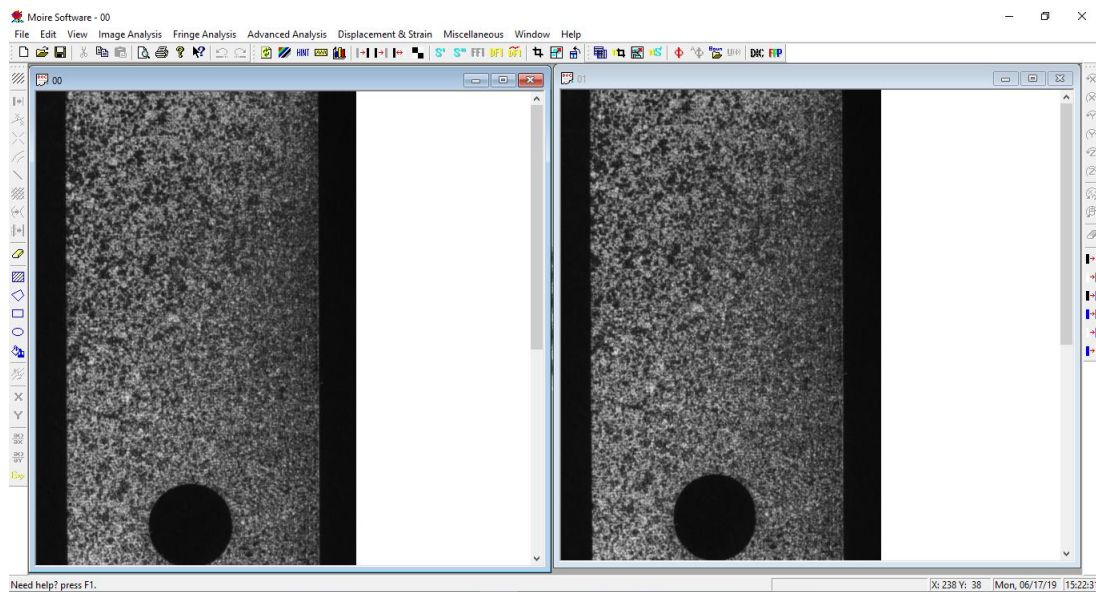


Figura 36- Interface de trabalho do programa *Moiré*.

- Procedimento de instalação:

O programa não se encontra disponível para descarregar e terá de ser solicitado a um dos seus autores. Para a correta instalação do programa é necessário a prévia instalação do *Visual Studio C++ 2015* ou o *Visual C++ 2015 Redistributable Package*.

- Formato e capacidade de processamento de imagens:

O programa só permite analisar duas imagens simultaneamente, uma de referência e outra deformada, podendo estas serem em diferentes formatos, já que são internamente convertidas.

- Funcionalidade:

Para o processamento das imagens é necessário seguir a sequência imposta pelo programa, o que por um lado facilita o utilizador, mas por outro torna a sua utilização pouco flexível.

- Tempo de processamento:

Uma vez que só são processadas duas imagens, não é possível realizar uma análise comparativa do tempo de processamento com os outros programas. No entanto, observou-se que o tempo de processamento das duas imagens não é significativo, isto é, inferior a 10 segundos.

- Análise e extração de resultados:

Ao contrário da maioria dos programas de correlação de imagem, o *Opticist-Moiré* está limitado à análise de duas imagens. Por esse motivo, não é adequado para realizar a análise da evolução do campo de deslocamentos ou das deformações ao longo de uma solicitação.

- Outras funcionalidades:

O programa possui um extenso número de ferramentas para manipular imagens, no entanto, a maioria destas não é dedicada para a manipulação de imagens com padrões de *speckle*.

5.2 Análise comparativa

Com o objetivo de identificar o programa que melhor serve os objetivos deste trabalho, é apresentado na Tabela 4, uma classificação das principais características dos programas selecionados, definida numa escala de um a cinco.

Tabela 4- Comparação qualitativa dos softwares avaliados.

Características	<i>GOM Correlate</i>	<i>VIC - 2D</i>	<i>Ncorr</i>	<i>DICe</i>	<i>Opticist-Moiré</i>
Instalação	5	4	4	4	4
Carregamento de imagens	4	5	5	5	2
Usabilidade	4	5	5	5	3
Ferramentas de controlo	5	4	4	4	4
Rapidez de processamento	4	5	3	2	3
Análise de resultados	5	5	4	4	3
Extração de resultados	5	4	4	3	3
Outras Funcionalidades	5	5	3	3	3
Pontuação final	37	37	32	30	25
Legenda	1 - Mau; 2 - Insuficiente; 3 - Razoável; 4 - Bom; 5 - Excelente;				

A análise comparativa das classificações atribuídas às características dos programas, mostra que os programas comerciais da *GOM Correlate* e *VIC-2D* são os que possuem a melhor classificação. Apesar de ambos apresentarem uma classificação muito semelhante em todos os domínios, o programa da *GOM Correlate* tem vantagem sobre o *VIC-2D*, por ser de utilização gratuita.

ENSAIOS EXPERIMENTAIS E DISCUSÃO DOS RESULTADOS

- 6.1 Avaliação e seleção do sistema de formação de imagem (lente)
- 6.2 Preparação dos provetes
- 6.3 Procedimento dos ensaios experimentais
- 6.4 Pré-processamento dos dados e seleção do programa
- 6.5 Determinação do campo de deformações pelo MEF
- 6.6 Ensaio de tração a elevadas taxas de deformação

6 ENSAIOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O sistema DIC é uma ferramenta experimental para a medição dos campos de deslocamentos e de deformações. No âmbito deste trabalho, pretende-se desenvolver um sistema com elevado desempenho. A sua avaliação será realizada por comparação das medições experimentais com os valores de referência, obtidos por técnicas de medição já estabelecidas. Uma vez que o seu desempenho é dependente da qualidade do sistema de formação de imagem, é apresentado no início deste capítulo a seleção da lente a ser usada no sistema de aquisição. Em seguida, são descritos os ensaios experimentais, realizados no Laboratório de Ensaios Tecnológicos (LET), que incluem o processo de gravação do padrão de *speckle* nos provetes, a aquisição das imagens, o seu processamento e análise dos resultados.

6.1 Avaliação e seleção do sistema de formação de imagem (lente)

A câmara selecionada para este trabalho permite o uso de lentes com o encaixe *C-mount*, existindo ao dispor quatro lentes com diferentes distâncias focais. A seleção da lente mais adequada para a realização dos ensaios resultou do estudo da resolução das lentes. Este consistiu na medição do nível de contraste das imagens obtidas a partir de padrões de linhas com diferente espaçamento, cuja densidade é definida pelo número de pares de linhas por milímetro (*lp/mm*) [49].

Neste estudo, foram avaliadas lentes das marcas *Linos*[®], *Kowa*[®], *TV-Lens*[®] e *Leica*[®], cujas principais características estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5- Principais características das lentes analisadas.

Lente/Modelo	Características	Imagem
Linor [®] MeVis	C-mount, $f_L=25\text{mm}/F_L 1.6$	
Kowa [®] 12-1248	C-mount, $f_L=25\text{mm}/F_L 1.4$	
TV Lens [®] (-)	C-mount, $f_L=50\text{mm}/F_L 1.4$	
Leica [®] (-)	F-mount to C-mount, $f_L=50\text{mm}/F_L 2.0$	

A avaliação da resolução das lentes requer que seja utilizado um calibre de elevada resolução espacial. Assim, foi selecionado o “1951 USAF resolution test chart”, que apresenta um padrão com 9 grupos, formado por 6 elementos, em que cada elemento possui três barras de cor preta igualmente espaçadas. No global, o diferente espaçamento entre as barras permite definir uma gama com resoluções desde 0,250 até 912,3 pares de linhas. Resoluções espaciais desta magnitude só são possíveis de obter com recurso ao fabrico por fotolitografia [50].

Os testes consistem em medir o nível de contraste nas imagens, obtido através das diferentes lentes, até ao limite de resolução da câmara. Para tal, utiliza-se a ferramenta *Contrast*, desenvolvida no programa de aquisição, e cuja interface se apresenta na Figura 37.

Nesta ferramenta é definida uma linha que atravessa as três barras pretas de cada elemento, que determina automaticamente o nível de contraste e o número de píxeis ao longo do perfil definido pela linha.

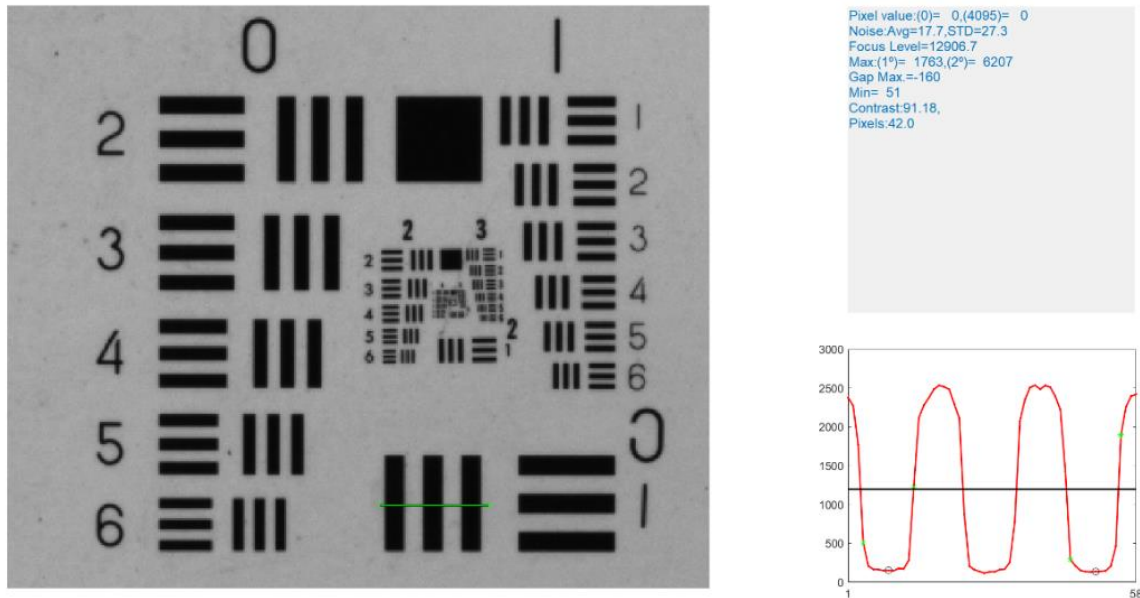


Figura 37-Ferramenta para análise do nível de contraste numa imagem.

O número de pares de linhas R resolvidos para cada elemento em análise é obtido através da expressão (15),

$$R = \frac{1}{2 \times \left(\frac{P}{L}\right) \times p} \quad [lp/mm] \quad (15)$$

em que P representa o número de píxeis analisados, L o número de linhas analisadas, e p a dimensão do píxel do sensor da câmara. O limite da resolução máxima da lente é habitualmente estabelecido para um contraste mínimo de 20%.

A Figura 38 apresenta a distribuição do contraste em função do número de linhas resolvidas para as quatro lentes em estudo. A qualidade da lente é função da sua capacidade para resolver o maior número de linhas. Uma vez que a lente da marca *Kowa*[®] apresentou o maior contraste para a resolução máxima da câmara (115 lp/mm), tendo sido seleccionada para a construção do sistema DIC.

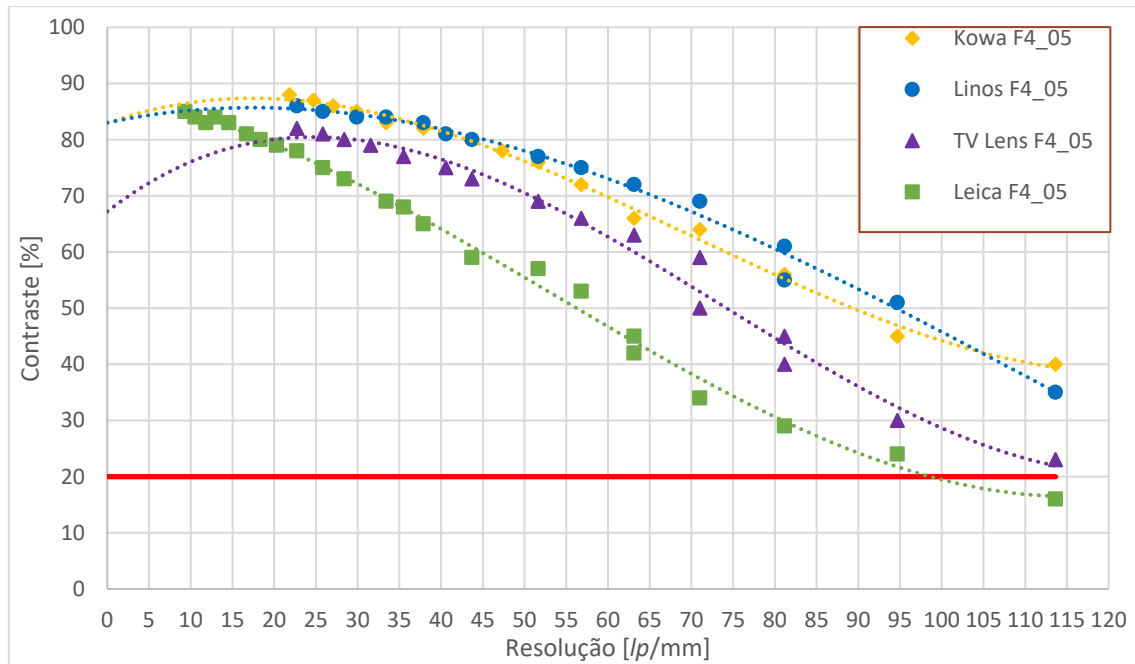


Figura 38- Resolução espacial das lentes.

A capacidade de resolução máxima requerida para uma lente é inversamente proporcional à dimensão do píxel no sensor da câmara. Assim, é recomendável selecionar uma lente que possua uma resolução ligeiramente superior à da câmara, de maneira a obter um sistema ótico equilibrado.

Todas as lentes introduzem diferentes tipos de distorções nas imagens, no entanto, a distorção radial é a mais proeminente. Relativamente a distorções óticas, as lentes telecêntricas apresentam distorções quase nulas, para além de eliminar efeitos de profundidade, o que as torna ideais para a técnica DIC. No entanto, como o campo de visão é igual à dimensão da lente frontal, estas estão normalmente limitadas a análises de pequenas dimensões.

Nas lentes de menor qualidade, a alternativa está em corrigir numericamente as distorções existentes. Atualmente, o *MatLab*[®] disponibiliza a ferramenta *Camera Calibrator* para a análise e determinação das distorções em lentes. Para a sua utilização é apenas necessário carregar imagens de um calibre em várias posições e ângulos.

A análise efetuada às distorções obtidas da lente selecionada, marca *Kowa*[®], Figura 39, apresenta uma distorção média de 0,21 píxeis. Este resultado atesta a elevada qualidade da lente, pelo que para esta aplicação não é significativo efetuar a correção das distorções [51].

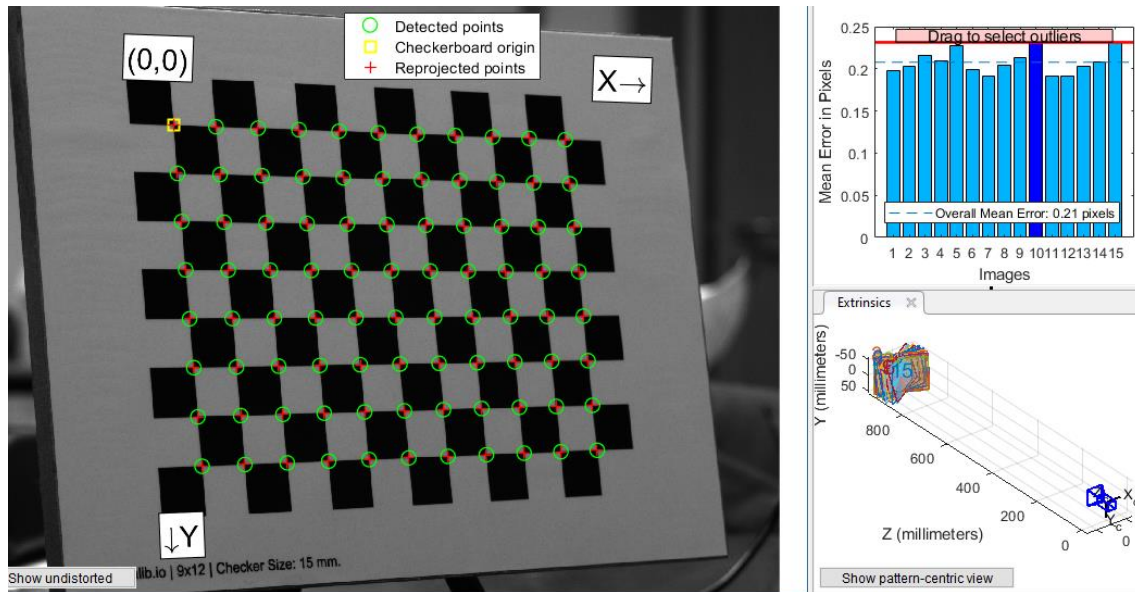


Figura 39- Determinação das distorções na lente Kowa® com a aplicação *Camera Calibrator* do *Matlab*®.

6.2 Preparação dos provetes

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema de correção digital de imagem construído, foram realizados um conjunto de ensaios de tração. Para esse efeito, foram fabricados diferentes provetes, por corte laser, a partir de chapa de alumínio com 2 mm de espessura da série 5754 [52], com as dimensões definidas pela NP EN 10002-1 2006, tabela B.1 [53], ver Figura 40. No total foram fabricados cinco provetes, sendo que em três destes foi introduzido um furo central com diâmetros de 3, 6 e 9 milímetros, de forma a criar localmente um gradiente de deformações.

Os restantes dois provetes foram usados para a determinação das propriedades mecânicas do material e, através da comparação da extensão calculada com a medida pelo extensómetro mecânico ao longo do ensaio, validar o sistema de correlação digital de imagem construído.



Figura 40-Provetes fabricados em alumínio com dimensões segundo a norma NP EN 10002-1 2006.

Antes de efetuar a pintura dos provetes é necessário proceder à limpeza dos mesmos, recorrendo a processos mecânicos e químicos, de maneira a remover as aparas resultantes do processo de corte laser, assim como eliminar qualquer tipo de sujidade. Em primeiro lugar, foi usada uma lixa a seco com granulometria P600, seguindo-se a remoção dos contaminantes da superfície com a utilização de acetona industrial [54]. Os provetes de alumínio não possuem um padrão *speckle* natural adequado ao estudo pela técnica DIC, sendo necessário fabricar um artificial. Foi selecionado o processo de fabrico de transferência por adesão, uma vez que, de acordo com a análise efetuada no terceiro capítulo, este permite obter o padrão *speckle* com as melhores características globais. Neste processo é primeiro recomendada a aplicação de uma camada de tinta branca com o objetivo de melhorar o nível de contraste do padrão. A tinta aplicada é branca mate, Figura 41 a), resistente à temperatura até 80°C e com boas propriedades elásticas. Na Figura 41 b) é visível o padrão *speckle* transferido para os provetes por este processo, o qual se encontra descrito no terceiro capítulo.

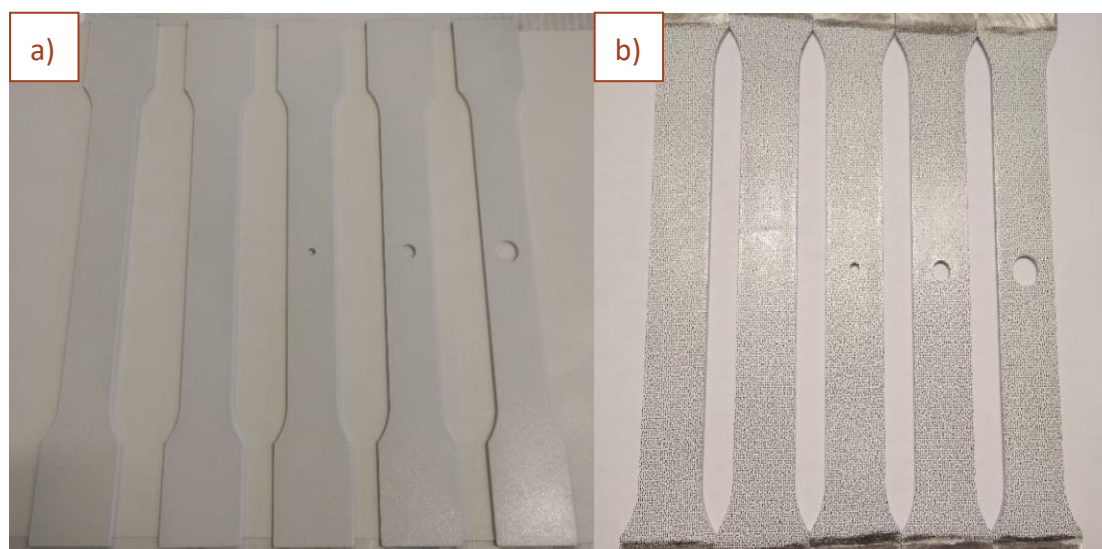


Figura 41-Processo de fabrico do padrão de *speckle* nos provetes: a) após deposição de uma fina camada de tinta branca mate; b) após a transferência do padrão por adesão.

Após a secagem da fina camada de tinta branca depositada nos provetes, segue-se a transferência do padrão *speckle* para os provetes. O processo de fabrico do padrão *speckle* consiste na impressão do padrão gerado computacionalmente numa impressora laser em papel de impressão corrente. O padrão de *speckle* é, posteriormente, transferido para a superfície dos provetes utilizando um adesivo adequado. Por fim, é necessário proceder à remoção do papel. De forma a facilitar o processo, este é humedecido com água e gentilmente friccionado até ser completamente removido, conforme é ilustrado no Anexo 3 - Padrão *speckle*.

Na Tabela 6 são apresentadas as dimensões mais relevantes dos provetes, sendo de referir que a largura foi medida em 3 secções distintas, igualmente espaçadas ao longo do comprimento útil.

Tabela 6-Dimensões dos provetes para ensaio.

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Largura 1 [mm]	19,67	19,65	19,65	19,64	19,62
Largura 2 [mm]	19,66	19,62	19,66	19,62	19,6
Largura 3 [mm]	19,66	19,64	19,68	19,63	19,60
Largura média [mm]	19,66	19,64	19,66	19,63	19,61
Espessura [mm]	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
Diâmetro do furo [mm]	-	-	3,00	6,00	9,00

6.3 Procedimento dos ensaios experimentais

O sistema desenvolvido para técnica DIC apresenta uma configuração compacta e portátil. Este é constituído apenas por alguns elementos, os quais estão identificados na Tabela 7. Na Figura 42 é apresentada uma perspetiva global do sistema e da máquina de tração universal *Shimadzu*, utilizados na realização dos ensaios de tração dos provetes.

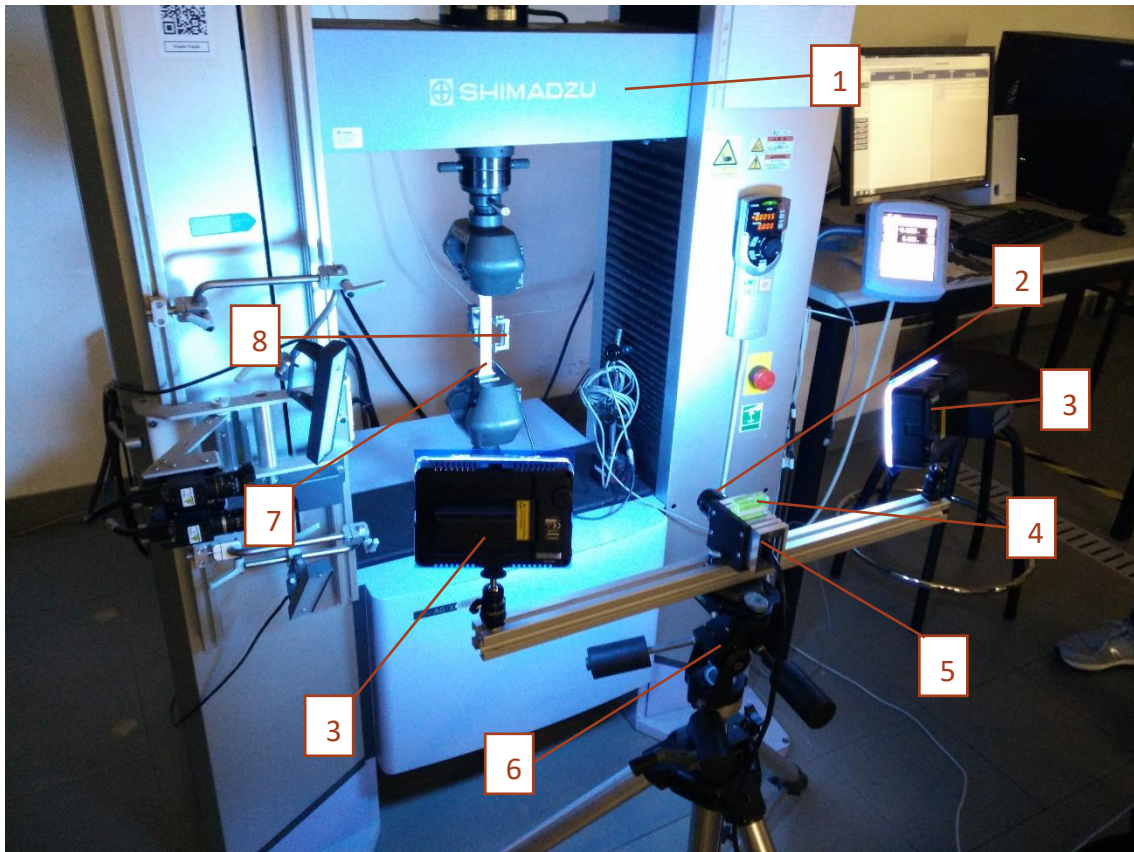


Figura 42-Componentes utilizados na realização dos ensaios.

Tabela 7-Identificação dos componentes representados na Figura 42.

Identificador	Componente
1	Máquina universal de ensaios, Shimadzu Autograph AG-X
2	Lente <i>Kowa</i> ® (12-1248), $f_L=25\text{mm}/F_L 1.4$
3	Iluminação LED Aputure AL-H198
4	Bolha de nível

5	Câmara Basler acA1600-20um
6	Tripé Manfrotto #029MK2
7	Provetes alumínio liga 5754
8	Extensómetro mecânico
Não visível	Placa National Instruments NI 9234
Não visível	Computador para aquisição das imagens

A realização das medições com a técnica DIC requer o posicionamento da câmara e o ajuste da iluminação, de forma a se obterem imagens com a máxima qualidade. Os procedimentos necessários para o ajuste do sistema e realização das medições com a técnica DIC é apresentado no Anexo 4 - Fluxograma [55], [56].

O tempo de exposição da câmara é um parâmetro de grande importância na obtenção de imagens de boa qualidade. Caso este seja demasiado longo, as imagens ficam com arrasto e ocorre perda de contraste. Por outro lado, quando o tempo de exposição é demasiado curto, as imagens ficam escuras e ocorre perda de modelação. Este problema pode ser ultrapassado com o uso de iluminação mais intensa. Em ambos os casos, um tempo de exposição desajustado traduz-se na perda de precisão e resolução da medição.

Consequentemente, torna-se pertinente calcular o tempo de exposição adequado para o ensaio, tendo em consideração o deslocamento por exposição D [píxeis], a velocidade de ensaio V [mm/s] e a escala da imagem S [píxeis/mm]. Em função destes parâmetros pode ser determinado o tempo de exposição máximo, utilizando a seguinte expressão [33]:

$$T = \frac{D}{V * S} [s] \quad (16)$$

Neste caso em particular, o ensaio apresenta uma velocidade de 4 mm/min, a escala das imagens é de 8,89 píxeis/mm e deve possuir um deslocamento por imagem inferior ao limite da técnica, de 0,01 píxel. Pela expressão anterior, o tempo de exposição calculado para cada imagem é de 17 milissegundos. No entanto, devido às condições de iluminação favoráveis nos ensaios, foi utilizado o valor de 8 milissegundos.

A Tabela 8 apresenta as condições dos ensaios realizados na máquina de tração para os cinco provetes.

Tabela 8-Condições de ensaio.

Provete	Extensômetro	Furo	Velocidade do ensaio	Frequência de aquisição	Número de imagens	Duração do ensaio
1	Sim	Não	-	1 Hz	21	69 s
2	Sim	Não	4 mm/min	1 Hz	46	46 s
3	Não	3 mm	1 mm/min	1 Hz	519	519 s
4	Não	6 mm	1 mm/min	0,5 Hz	657	329 s
5	Não	9 mm	1mm/min	0,5 Hz	371	186 s

Nos provetes 1 e 2 foi colocado um extensômetro mecânico com o intuito de medir a extensão e obter a deformação do provete com elevada precisão, Figura 43. Os valores obtidos servirão de base à validação das medições realizadas com a técnica DIC. Devido a um erro na definição das unidades do ensaio de tração do provete 1, foram excluídos os valores obtidos deste provete para este estudo.

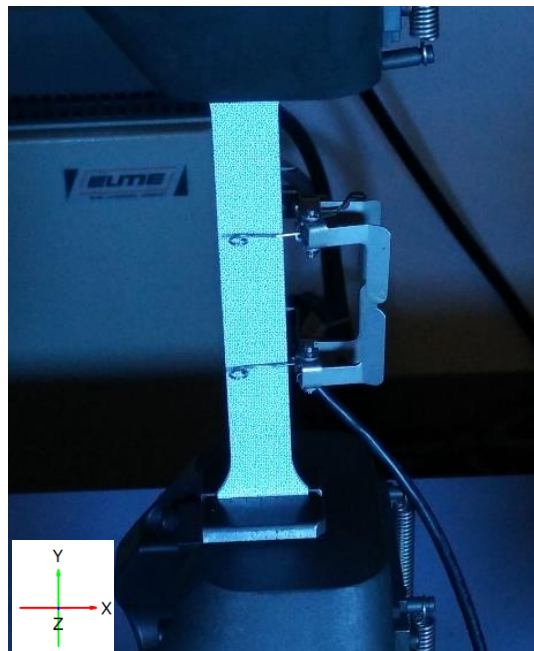


Figura 43-Colocação do extensômetro mecânico para obtenção das extensões.

Durante o ensaio, são adquiridas as imagens pela câmara e, simultaneamente, registado o valor da força medido na célula de carga e o valor do deslocamento medido nas maxilas da máquina de tração, os quais são adquiridos através do equipamento da National Instruments modelo 9234, mostrado na Figura 44.



Figura 44-Placa de aquisição de sinal para aquisição do valor da força e do deslocamento produzidos na máquina de tração.

6.4 Pré-processamento dos dados e seleção do programa

Após os ensaios, é necessário realizar o pré-processamento das imagens e dos sinais adquiridos, de modo a poderem ser processadas pelos programas de correlação digital de imagem. Neste processo são convertidas as imagens selecionadas de uma escala de 12 bits para a escala de 8 bits. Nesta conversão deverá ser escolhida a gama útil de intensidades para que, após a conversão para a escala de 8 bits, as imagens apresentem uma gama dinâmica com 256 níveis de intensidade, conforme já descrito no capítulo 3.

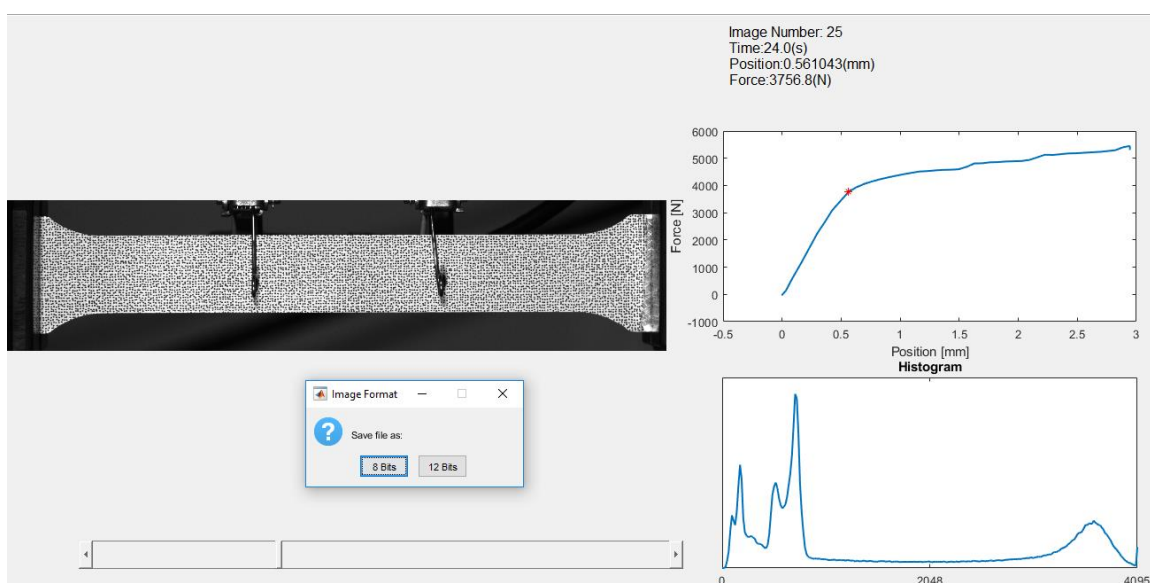


Figura 45-Processo de seleção e conversão das imagens para a escala de 8 bits.

O campo dos deslocamentos e deformações são determinados através da análise das imagens pré-processadas, recorrendo aos programas de correlação digital de imagem *GOM Correlate*, *VIC-2D*, *Ncorr* e *DICe*. Os parâmetros de análise nos quatro programas mantiveram-se constantes para permitir o estudo comparativo do seu desempenho. Este traduz-se pela aplicação de um *subset* de 19x19 píxeis, um espaçamento de 4 píxeis e um comprimento de 50 milímetros como referência para avaliação da informação, valor relativo ao extensómetro mecânico usado durante os ensaios.

A realização da análise comparativa, entre os resultados obtidos pelos diferentes programas de correlação e o extensómetro mecânico, requer, a introdução de um extensómetro virtual (VSG), nos programas, com a mesma dimensão e na mesma posição. Com base no extensómetro virtual são determinadas as extensões, as quais são comparadas na Figura 46 com as obtidas a partir extensómetro mecânico.

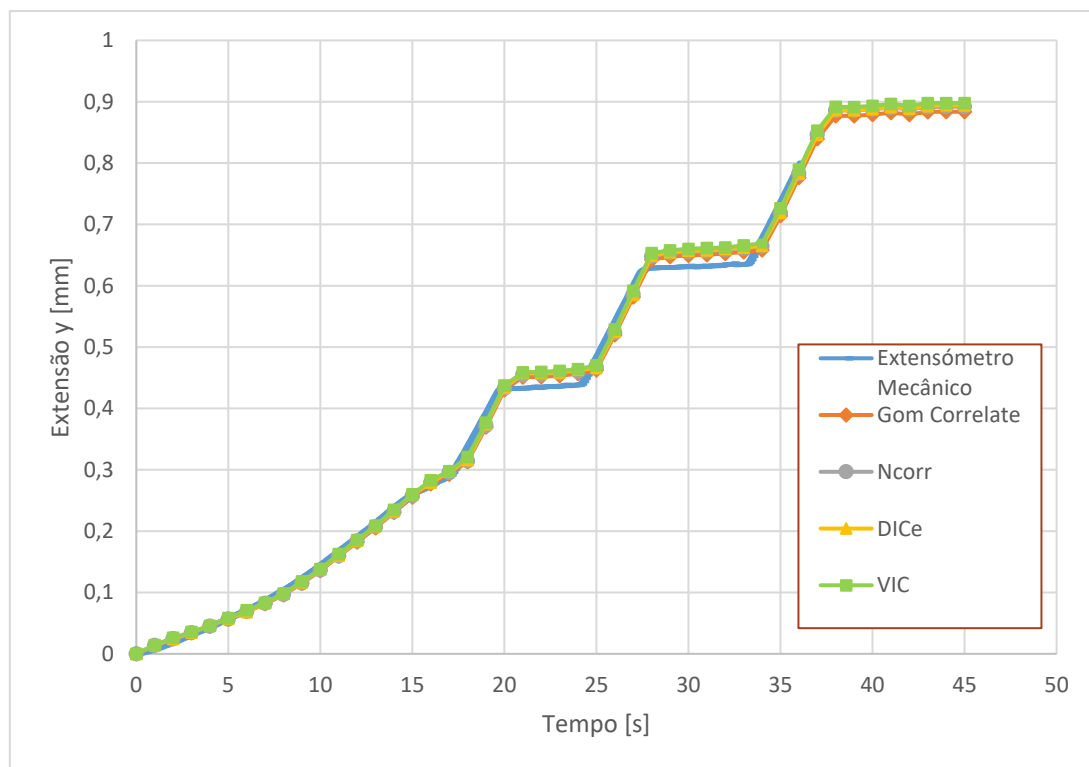


Figura 46 - Comparação das extensões obtidas pelo extensómetro mecânico e pelos programas de correlação.

Na Figura 46 é possível observar que as extensões obtidas por todos programas DIC seguem, de forma muito idêntica, os valores medidos pelo extensómetro mecânico, mesmo com a presença de irregularidades geradas pelo ensaio, o que atesta a confiabilidade da técnica. Refira-se que o extensómetro mecânico cessou automaticamente a aquisição de sinal ao atingir a extensão de 0,8 mm, razão pela qual o registo de extensão no tempo é inferior ao medido pelos programas de correlação

digital de imagem. Relativamente a estes, não é possível detetar diferenças significativas.

A deformação apresenta um comportamento no tempo igual ao da extensão. No cálculo da deformação de engenharia, ε , foi utilizado o comprimento de referência L_0 de 50 milímetros, correspondente ao extensómetro mecânico, e determinada através da expressão (17), na qual ΔL representa a extensão em milímetros:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [mm/mm]} \quad (17)$$

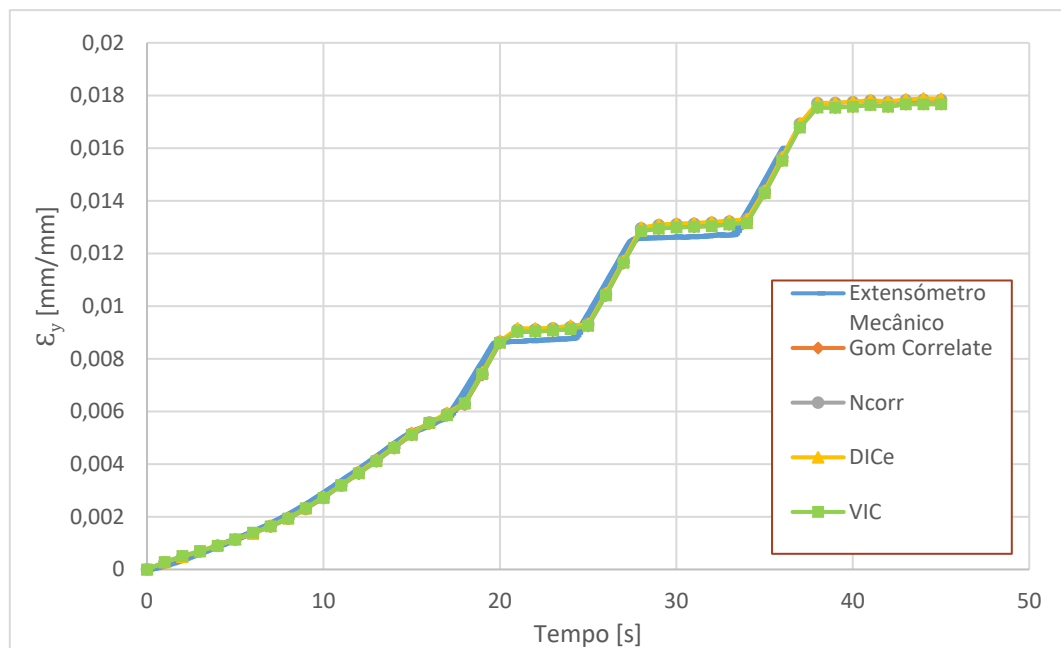


Figura 47 - Comparação das deformações obtidas pelo extensómetro mecânico e pelos diferentes programas de correlação.

Dado que a comparação dos resultados obtidos para os diferentes programas observados, nas imagens anteriores, é dificultada pela grande semelhança dos valores obtidos, torna-se necessário analisar as razões das diferenças relativamente aos valores obtidos com o extensómetro mecânico. Na Figura 48 é apresentado o erro relativo para os resultados obtidos pelos quatro programas de correlação digital de imagem em função da extensão.

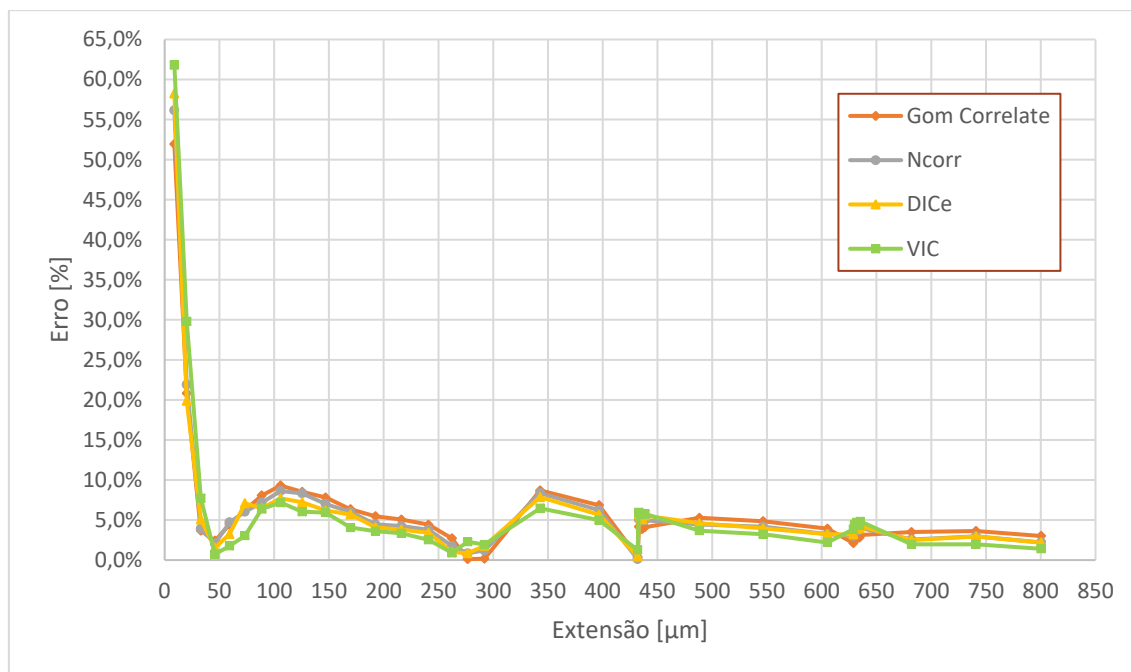


Figura 48- Erro relativo dos programas de correlação.

Esta revela que para valores da extensão iguais ou inferiores a 30 micrómetros todos os programas apresentam erros significativos. Por esse motivo, é assumido ser este o limite da resolução da técnica para este ensaio. É de referir que erros até 10% são perfeitamente admissíveis em ensaios experimentais, os quais podem ser justificados principalmente por ruído presente nas imagens captadas, desalinhamentos do sistema DIC relativamente ao provete, distorções óticas, entre outros.

A atual maturidade dos algoritmos de correlação implementados, permite a obtenção de resultados muito semelhantes independentemente do programa selecionado. Com base nos resultados obtidos neste capítulo e no anterior, o *GOM Correlate* apresenta-se como o programa de análise globalmente mais apto, destacando-se pela rapidez de processamento, vasta gama de ferramentas, atualizações constantes pela empresa e, não menos importante, por ser um programa de uso gratuito com ligeiras restrições na sua funcionalidade. Pelas razões acima mencionadas, é o programa selecionado para futuras análises.

A aplicação do método dos elementos finitos (MEF) para determinar o estado de deformação, criado durante um ensaio de tração num provete com furo central, será introduzido em seguida. Este servirá de referência para a análise dos resultados obtidos pelo programa de correlação da *GOM Correlate*.

6.5 Determinação do campo de deformações pelo MEF

O MEF consiste numa sequência de operações numéricas que permitem determinar as soluções aproximadas de um conjunto de equações diferenciais. Quando aplicado à análise de estruturas, este permite a determinação dos estados de tensão e de deformação produzidos por solicitações. O comportamento de cada um dos elementos finitos está associado a uma equação diferencial. Isto faz com que, quanto maior for o número de elementos finitos, maior é a complexidade inerente à análise.

Na prática, quanto maior o número de elementos em que a estrutura está discretizada, mais precisos serão os resultados obtidos, até um certo limite.

Na análise por MEF, é conveniente realizar um estudo de convergência da malha, cujo objetivo é determinar a sua dimensão, de forma a que, simultaneamente, não comprometa a veracidade dos resultados, nem consuma recursos temporais e computacionais excessivos.

Os estudos aqui apresentados por MEF são realizados no programa comercial *Ansys Inc.*, usando o módulo de análise estática em ambiente *Workbench*. Os modelos CAD dos provetes com furo central foram criados no programa *SolidWorks®* e importados como ficheiro STEP. A partir da análise do comportamento dos provetes a uma solicitação estática, semelhante à realizada no ensaio de tração, e para um caso particular de carregamento, são extraídos os campos de deformações e o perfil de deformação ao longo da secção transversal do provete, centrada com o furo, Figura 49.

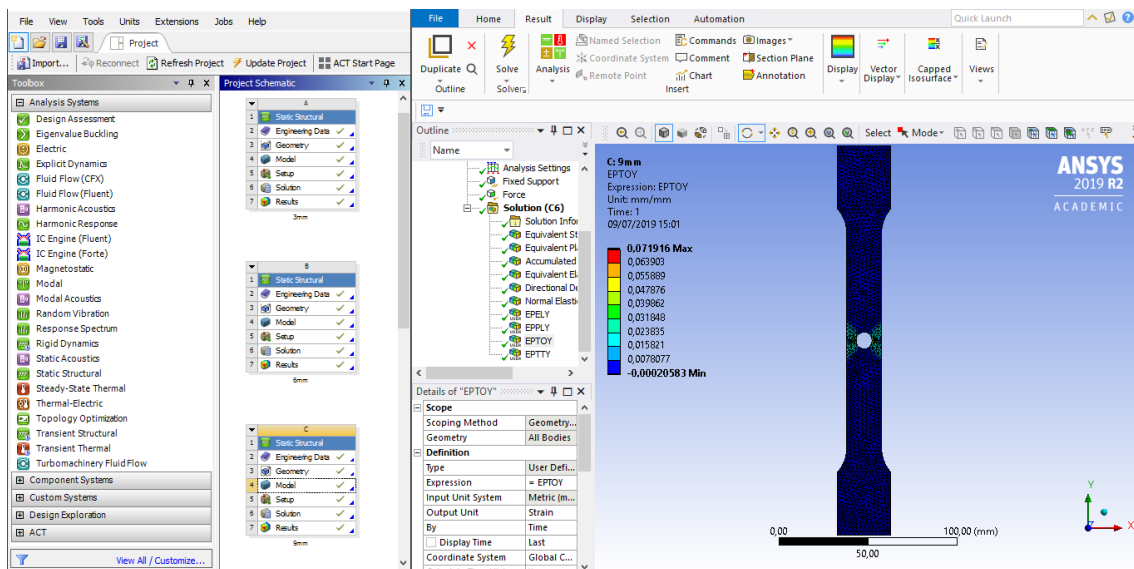


Figura 49-Ambiente de trabalho do *Ansys Workbench*.

6.5.1 Análise do campo de deformações nos provetes com furo

Com a introdução de um furo no centro do provete é introduzido um gradiente na distribuição de deformações próximo da região do furo, que depende do rácio entre a largura do provete e o diâmetro do furo, Figura 50.

Uma vez que o DIC é uma técnica experimental de campo, é possível extrair o campo de deformações na zona do furo e comparar diretamente com os resultados obtidos pelo MEF.

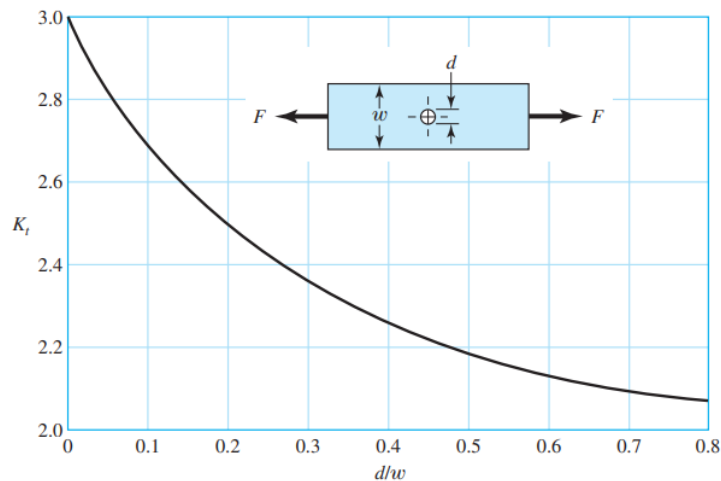


Figura 50-Variação da concentração de tensões em função do diâmetro e largura do provete (adaptado de [57]).

A simulação levada a cabo pelo MEF tem em consideração o comportamento do material nos regimes elástico e plástico. Para proceder a esta análise foi necessário introduzir a componente plástica da curva tensão–deformação real do material. Neste caso, a partir do ensaio realizado ao provete 2, foi obtida a curva tensão-deformação convencional para liga de Alumínio 5754. A deformação real ε_r pode ser obtida pela seguinte expressão,

$$\varepsilon_r = \ln(\varepsilon + 1) \text{ [mm/mm]} \quad (18)$$

na qual é necessário obter experimentalmente a deformação convencional ε .

Por conseguinte, a tensão real σ_r resulta pela aplicação da expressão (19) e requer a tensão convencional σ [MPa], bem como, a anteriormente referida deformação convencional extraída do ensaio de tração.

$$\sigma_r = \sigma (\varepsilon + 1) \text{ [MPa]} \quad (19)$$

Na Figura 51 estão representadas a curva tensão-deformação convencional medida e a curva tensão-deformação real, a qual foi obtida por aplicação das expressões (18) e (19).

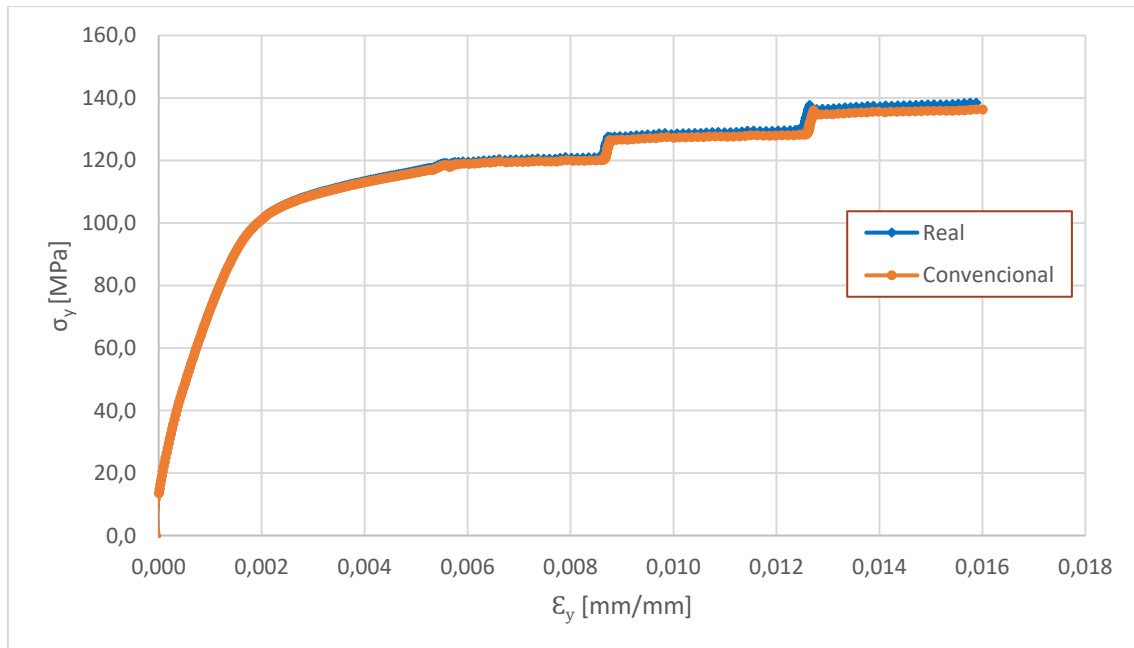


Figura 51 – Curvas tensão-deformação convencional e corrigida.

A diferença entre as curvas tensão-deformação é reduzida, uma vez que estas retratam apenas a parte inicial do ensaio de tração, muito antes do provete atingir o ponto de rotura, de forma a evitar danificar o extensómetro mecânico.

Na simulação por MEF foi considerado o modelo bilinear para o comportamento do material elasto-plástico, ver Anexo 2 - Curva bilinear, sendo necessário definir o módulo de elasticidade do material, a tensão limite convencional de proporcionalidade, o coeficiente de Poisson e o módulo plástico.

A tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2 % do material é determinada pela intersecção de uma reta paralela à curva com o módulo de Young do material a 0,2% de deformação, obtendo-se assim o valor de 110 MPa. O módulo plástico foi identificado com uma aproximação linear à curva plástica do material a partir do ponto correspondente à tensão limite de proporcionalidade, sendo o valor identificado de 2,19 GPa.

Estes valores foram obtidos para o ensaio com o provete 2, uma vez que o ensaio com o provete 1 não foi realizado à taxa de deformação definida pela norma NP EN 10002-1 2006.

De referir ainda que a curva tensão-deformação do provete 2, presente na Figura 52, verificou algumas anomalias, as quais se conjectura estar associadas à presença de sujidade entre os mordentes e a garra da máquina de tração, introduzindo instabilidade no conjunto de fixação.

Todavia, os resultados obtidos estão em linha com os encontrados na literatura para este material, obtendo-se um módulo de elasticidade de 71 GPa e uma tensão limite de proporcionalidade a 0,2 % de 110 MPa.

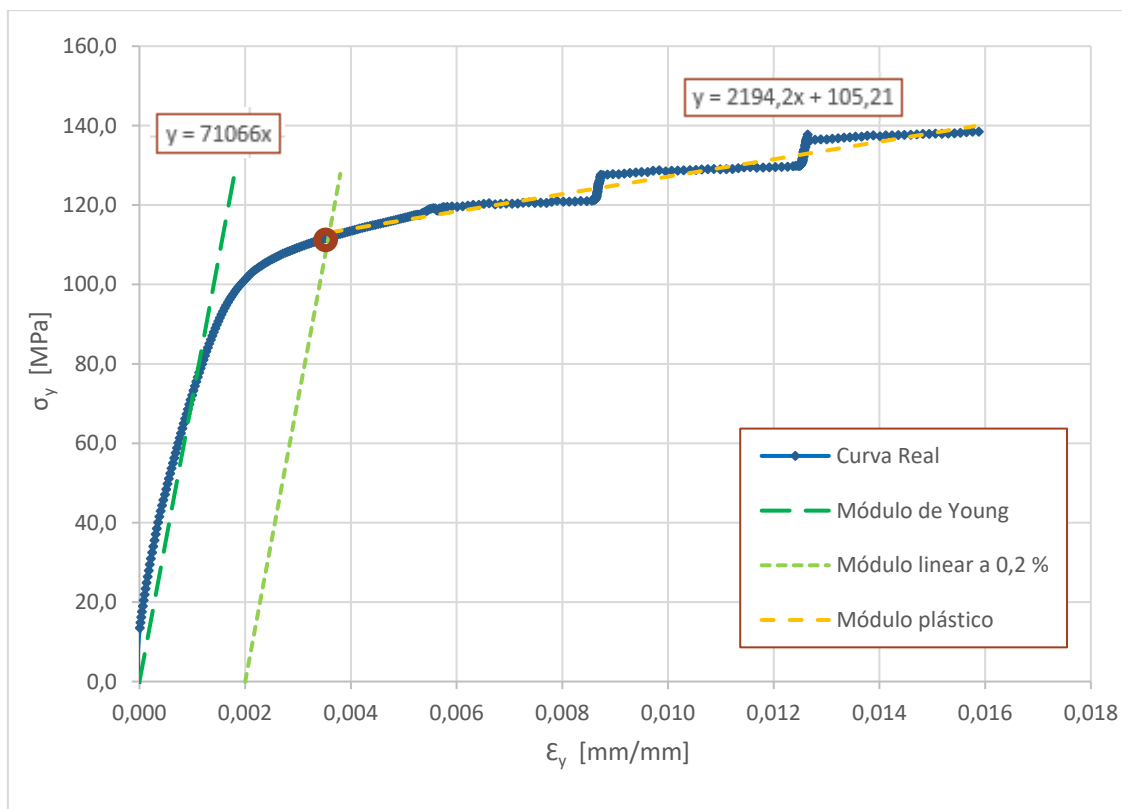


Figura 52 - Determinação do limite de proporcionalidade dos módulos elástico e plástico para valores obtidos da curva real.

A simulação numérica do ensaio de tração do provete foi realizada para um instante particular, em que se prescreveu deslocamento nulo numa das extremidades e aplicada uma força constante na outra. A força foi selecionada tendo como base a qualidade dos resultados obtidos pela técnica DIC para os três provetes com furo central.

Na Tabela 9 são apresentadas a força e o número do registo da imagem, obtidas pelo sistema DIC para os três provetes com furo central. Estes foram selecionados com o objetivo de realizar um estudo comparativo entre os resultados experimentais e a simulação numérica.

Tabela 9- Forças selecionadas para simulação MEF e o número do registo das imagens.

Nº do Provete	Força	Nº da Imagem
Provete 3	3538,4 N	34
Provete 4	3522,8 N	76
Provete 5	3521,9 N	117

Relativamente à discretização da malha, foi seleccionado o elemento tetraedro de ordem quadrática com dimensões entre 2 mm e 4 mm, sendo aplicado na região transversal ao furo um critério de refinamento da malha para 0,5 mm, ver Figura 53 b). Pretende-se, assim, obter uma malha refinada nas zonas de maior concentração de tensões e reduzir o tempo de simulação, sem exceder o limite de 32 000 nós da versão estudante do *Ansys*, usada neste estudo. Na figura 51 a) é igualmente representado um parâmetro relativo à qualidade da malha no qual, pela legenda, quanto mais próximos ao valor de 1 os elementos tiverem, melhor a qualidade da malha.

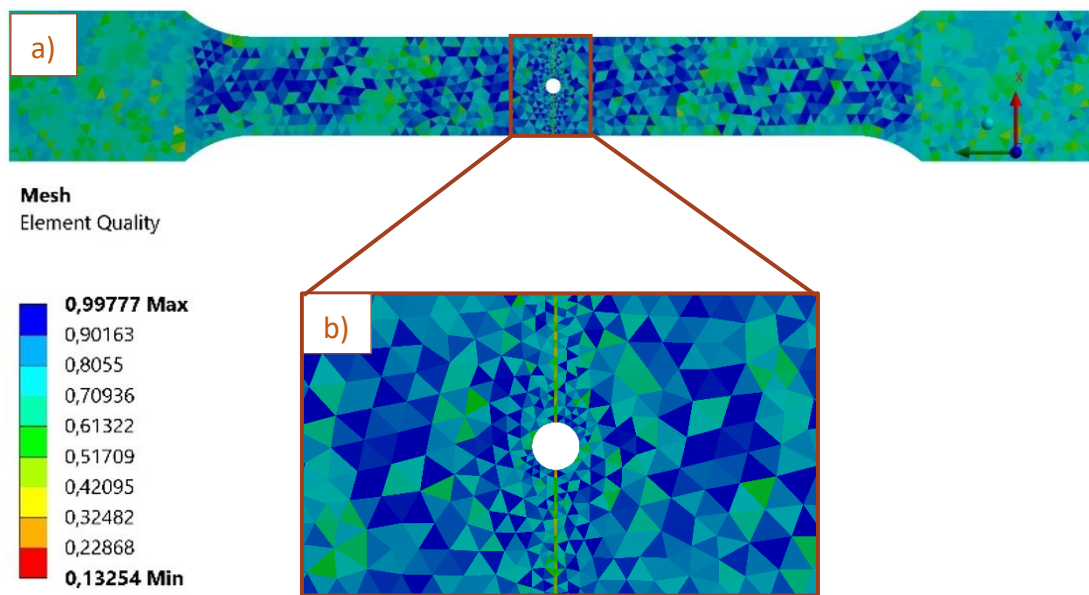


Figura 53 – Discretização e qualidade da malha usada na simulação: a) - provete 3; b) – amplificação da zona com refinamento dos elementos de malha junto ao furo.

Na Figura 54 são apresentados os campos de deformações na direção longitudinal obtidos pelo MEF, e, por sua vez, na Figura 55, estão representados os correspondentes campos deformações experimentais obtidos pela técnica DIC. A análise comparativa destes campos revela semelhanças globais entre as técnicas de análise utilizadas, nas quais é visível a forte concentração de deformações junto ao furo, como seria expectável.

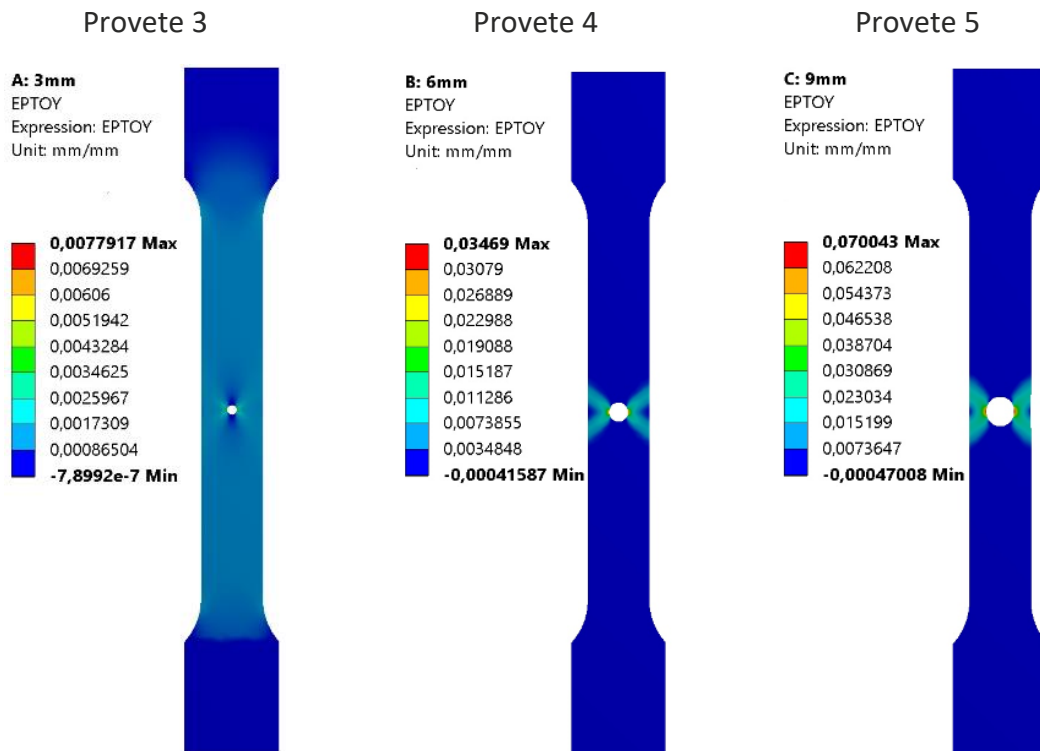


Figura 54-Campo de deformações na direção axial do provete obtidas por MEF: - Provete 3; - Provete 4; - Provete 5.

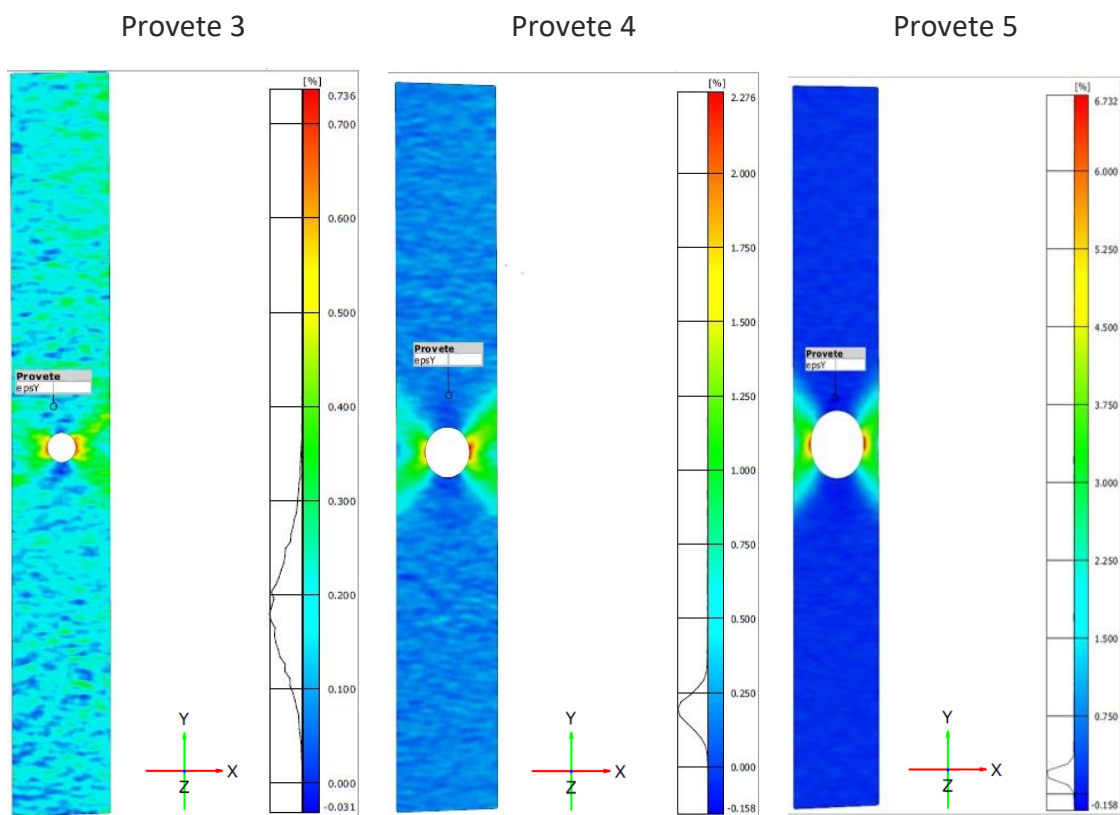


Figura 55 – Campo de deformações na direção axial do provete obtidas pela técnica DIC: - Provete 3; - Provete 4; - Provete 5.

Dado que os campos de deformação junto aos furos na direção transversal ao provete apresentam fortes gradientes, estes serão alvo de uma análise mais detalhada, de modo a aferir a qualidade dos resultados obtidos pela técnica de DIC, por comparação com os resultados obtidos pelo MEF.

6.5.2 Análise do perfil das deformações axiais ao longo da secção do provete

A seção transversal centrada com o furo, conforme se exemplifica na Figura 56, é usada para extrair o perfil das deformações ao longo da secção do provete, no qual se prevê a presença de fortes gradientes.

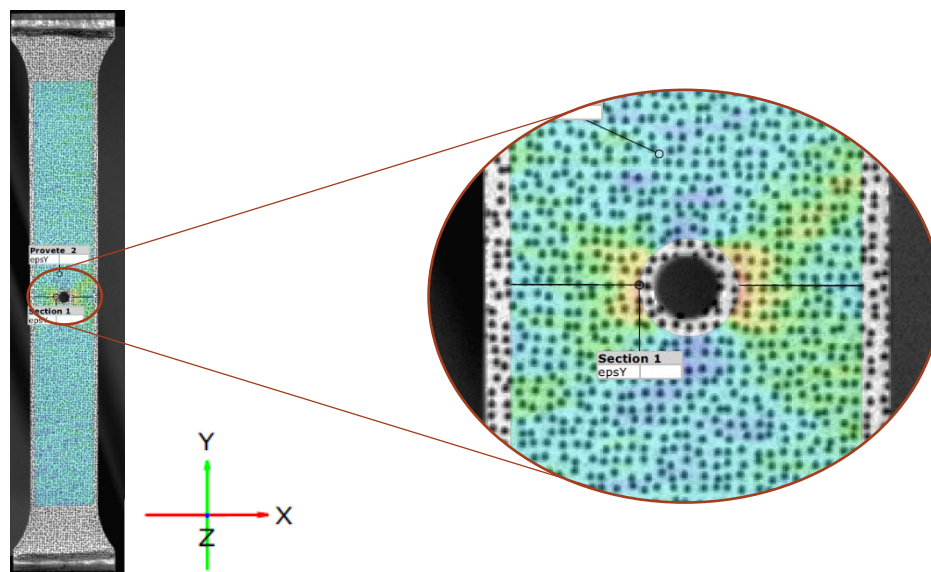


Figura 56-Representação da secção para análise do perfil das deformações na direção axial do provete.

Na Figura 57 são comparados os perfis das deformações na direção axial, ϵ_y , obtidos pelo MEF e pelo DIC para os três provetes com furo. Em virtude da técnica DIC não ser capaz de determinar o campo de deformações até ao limite da secção do provete, ver Figura 56, este apresenta sempre um perfil de menor dimensão do que o obtido pelo MEF. Por outro lado, na região central do perfil, não são representadas as deformações, visto que este corresponde à ausência de material, devido ao furo central.

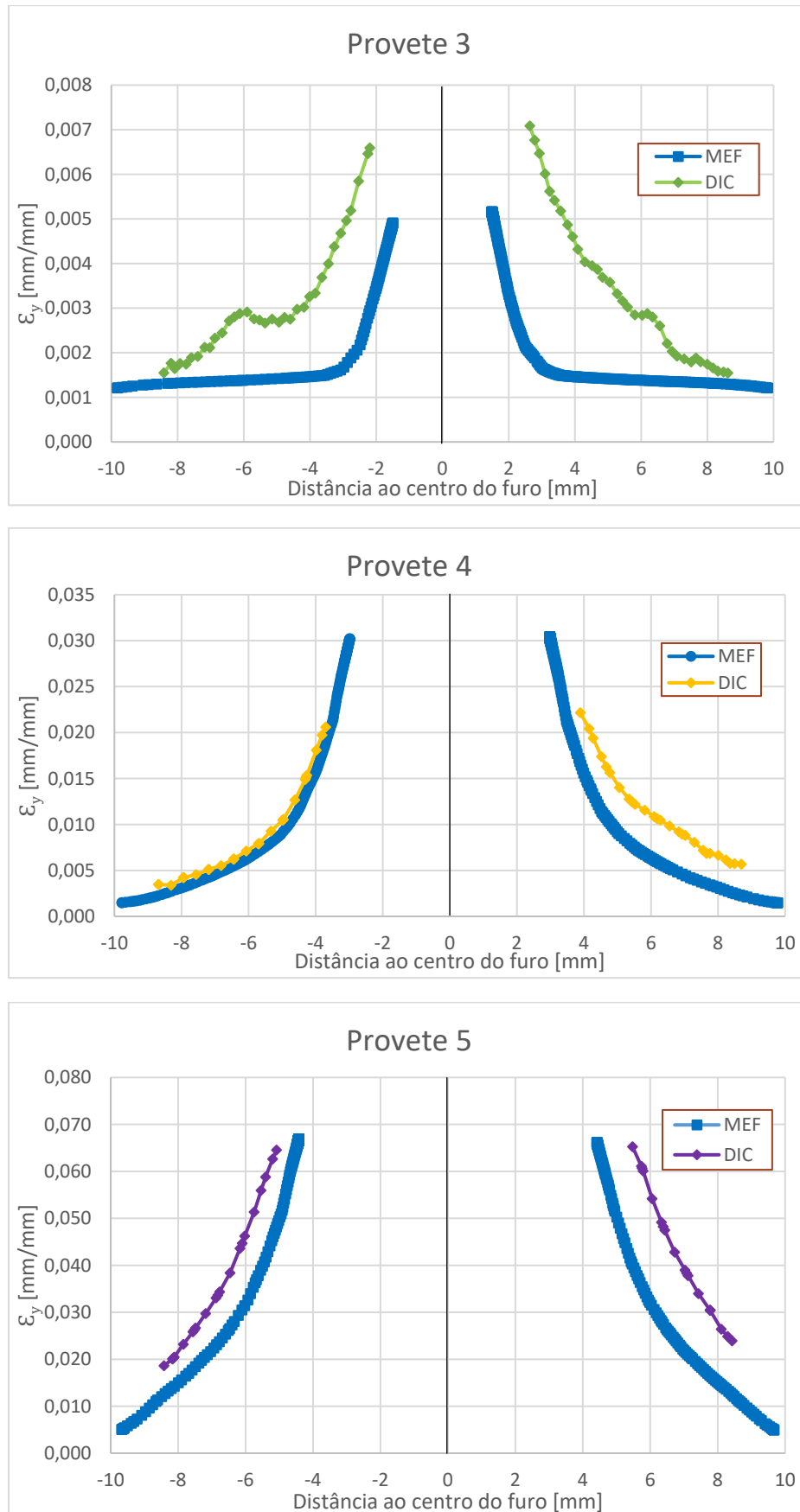


Figura 57 – Representação dos perfis de deformações ϵ_y ao longo da secção transversal dos provetes e centrado com os furos, obtidos pelo MEF e pela técnica DIC.

Comparando os resultados apresentados para o provete 3 com o furo de 3 milímetros, é perceptível uma baixa correlação, que pode ser justificada pela baixa razão sinal-ruído presente na imagem 34, juntamente com fatores como a simplificação das propriedades plásticas do material usadas na simulação pelo MEF, baixa resolução espacial para o nível de deformações, e dimensão de *subset* inadequada para o tipo de gradiente de deformações junto ao furo. No que se refere aos resultados para o provete 4 com furo de 6 mm, observa-se um perfil de deformações mais próximo entre MEF e o DIC. Esta melhoria nos resultados está relacionada com o aumento do nível de deformações provocado pela redução da secção resistente. O formato do perfil é indicador do estado avançado das deformações em grande parte da secção do provete. No caso do provete com o furo de 9 mm, os dois perfis possuem uma evolução bastante idêntica, apesar de desfasados em amplitude. O desfasamento constante dos valores dos perfis pode ser em grande parte justificado pelo desajustamento nas propriedades do material usadas na simulação pelo MEF, devido a simplificações no modelo utilizado.

Um aspeto importante evidenciado pela análise dos perfis obtidos pela técnica DIC é a assimetria nos perfis relativamente ao centro do furo. Isto é provocado por movimentos de corpo rígido observados durante a fase inicial do ensaio de tração, introduzindo desalinhamentos nas medições relativamente ao eixo de coordenadas utilizado.

A análise realizada permite retirar várias conclusões sobre os parâmetros de ensaio a considerar em futuras análises, tais como:

O campo de visão (ROI) utilizado deve ter em consideração a dimensão da zona de interesse e o nível dos gradientes de deformação existente. Para concretizar este objetivo é proposto que a análise seja realizada em duas etapas. Na primeira, deve ser utilizado um ROI que englobe toda a superfície, com o objetivo de caracterizar globalmente o campo de deformações. Caso se pretenda analisar com elevada precisão e detalhe zonas com forte gradiente, o ROI deve ser reajustado para aumentar a resolução espacial.

A dimensão do *subset* também possui uma influência considerável na exatidão dos valores obtidos para a deformação. A seleção de um *subset* de grandes dimensões permite obter resultados com maior exatidão e menor ruído, contudo, conduz à suavização dos resultados, o que é indesejável na presença de fortes gradientes de deformação. Assim, a dimensão do *subset* deverá ter em consideração o nível de ruído, a resolução espacial e a presença de gradientes no campo de deformações, entre os quais é necessário encontrar um ponto de equilíbrio [58].

A divergência entre resultados é comum quando são analisadas regiões com forte concentração de deformações, como em casos de extremidade das fendas e na vizinhança de furos [58]. Apesar de algumas discrepâncias nos resultados obtidos pela técnica DIC, os quais são devidos, principalmente, à falta de resolução espacial da medição e ruído presente nas imagens, podemos afirmar que estão em linha com os previstos pelo MEF.

6.6 Ensaio de tração a elevadas taxas de deformação

Os materiais apresentam comportamento distinto que depende da taxa de deformação a que são sujeitos. Para fenómenos de impacto, o comportamento dos materiais deve ser previsto com base nas curvas tensão-deformação obtidas através de ensaios a elevadas taxas de deformação. Daqui resulta a necessidade de desenvolver e realizar ensaios para a caracterização do comportamento destes materiais, o qual revela ser de considerável importância, principalmente, para indústrias como a automóvel e defesa. Um dos equipamentos que permite a realização de ensaios a elevadas taxas de deformação é designado de barra de Hopkinson. A associação de técnicas DIC com ensaios experimentais permite caracterizar de forma global, e sem contacto, o comportamento dos materiais e suas propriedades.

Os ensaios realizados na barra de Hopkinson têm como principal objetivo avaliar a capacidade de realizar medições do campo de deformações no plano a elevadas taxas de deformação usando a técnica DIC.

Os ensaios com a barra de Hopkinson foram realizados no Laboratório de Ótica e Mecânica Experimental (LOME), pertencente ao INEGI, situado na Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. A Figura 58 apresenta a vista geral da montagem experimental, com a barra de Hopkinson (1), sistema de iluminação e câmara de alta velocidade usada para registar as imagens do provete durante o ensaio.

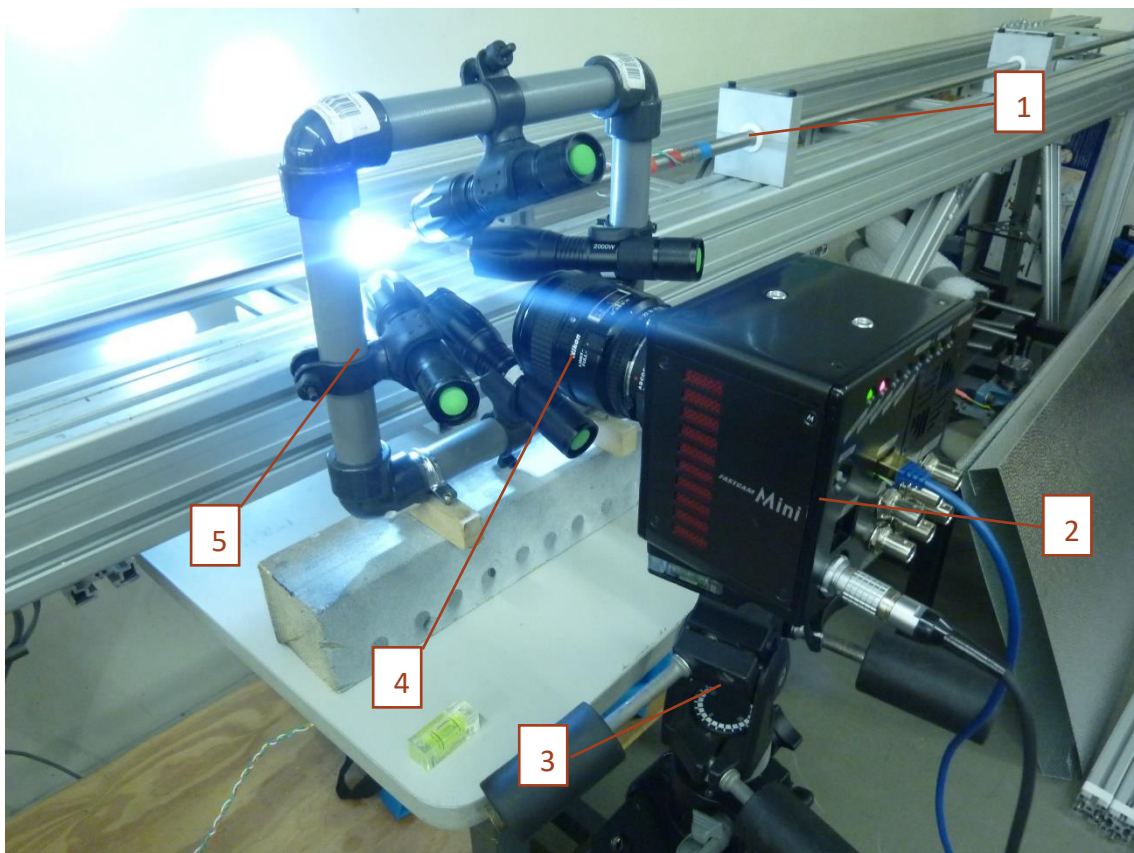


Figura 58-Vista global da montagem para a realização dos ensaios na barra de Hopkinson.

Para o registo das imagens do provete durante os ensaios foi usada uma câmara de alta velocidade Photron FASTCAM Mini AX200 (2), um tripé Manfrotto #029MK2 (3), uma lente NIKKOR (AF MICRO $f_L=60\text{mm}$, $F_L 2.8$) (4) e um sistema de iluminação LED (5) de elevada intensidade que foi desenvolvido especificamente para estes ensaios.

6.6.1 Descrição da barra de Hopkinson

Existem várias técnicas para realizar ensaios a elevadas taxas de deformação com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas dos materiais, sendo a mais conhecida e utilizada a barra de Hopkinson.

Os ensaios na barra de Hopkinson, também designada de *Split Hopkinson Bar Technique* (SHBT), permitem caracterizar o comportamento dos materiais à tração ou compressão a elevadas taxas de deformação. Inicialmente, a barra de Hopkinson foi desenvolvida para ensaios de compressão, podendo ser modificada para realizar ensaios de tração [59].

O provete a ensaiar é posicionado entre a barra de entrada e a barra de saída, Figura 59. A energia necessária à solicitação do provete é transferida para a barra de entrada pelo impactor, normalmente acionado por um sistema pneumático [59].

Ambas as barras são instrumentadas com extensómetros elétricos para obter o registo das ondas elásticas incidentes, transmitidas e refletidas.

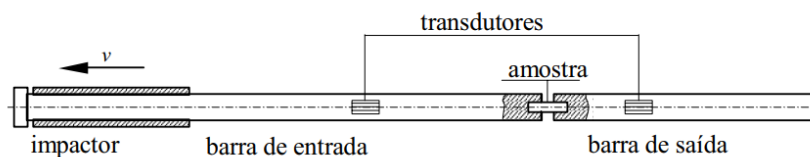


Figura 59- Representação esquemática da barra de Hopkinson para ensaio de tração (adaptada de [59]).

Sempre que um impulso incidente atinge uma secção onde se verifique alteração da impedância mecânica, neste caso, um provete de ensaio, forma-se uma onda de reflexão, Figura 60 .

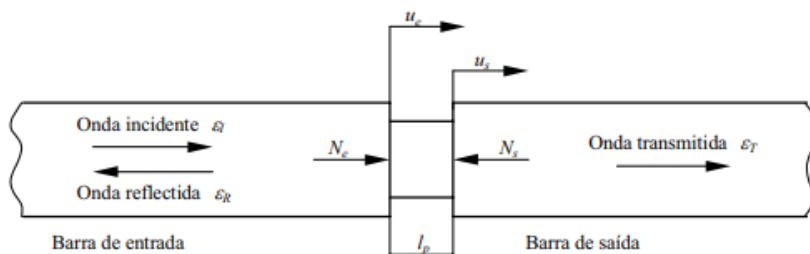


Figura 60-Esquema exemplificativo dos três tipos de ondas produzidas durante o ensaio (adaptada de [59]).

A razão de amplitude dos impulsos refletido e transmitido é definido pelas características de impedância mecânica do provete, que podem variar caso ocorra rotura, deformação plástica ou aumento de secção [59].

Existem vários modelos matemáticos que descrevem a propagação das ondas, porém, o mais utilizado é baseado na análise *1-wave*, expressão (20), o qual apenas contabiliza o impulso transmitido $\varepsilon_T(t)$ para calcular a tensão atuante no provete $\sigma(t)$ em função do tempo [59],

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \text{ [Pa]} \quad (20)$$

em que E_0 representa o módulo de elasticidade das barras [Pa], A_0 a secção reta das barras [m], e A a secção reta do provete [m].

A curva tensão-deformação pode ser traçada a partir da medição dos impulsos registados pelos extensómetros eléctricos. Pela expressão (21) obtém-se a deformação normalizada do provete $\varepsilon_n(t)$, considerando a velocidade de propagação do material da barra c_0 [m/s], o comprimento do provete l_p [m] e a deformação da onda refletida $\varepsilon_R(t)$ [m/m].

$$\varepsilon_n(t) = -\frac{2c_0}{l_p} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \text{ [m/m]} \quad (21)$$

Os extensómetros devem estar montados nas barras de entrada e saída, de forma a evitar a sobreposição das ondas incidentes, transmitidas e refletidas [59].

Derivando a expressão (21) em ordem ao tempo, obtém-se a expressão de cálculo da taxa de deformação $\dot{\varepsilon}_n(t)$ pela análise *1-wave* (22), [59].

$$\dot{\varepsilon}_n(t) = -\frac{2c_0 \varepsilon_R(t)}{l_p} \text{ [(m/m)/s]} \quad (22)$$

As ondas de deformação elásticas, incidente- $\varepsilon_I(t)$, refletida- $\varepsilon_R(t)$ e transmitida- $\varepsilon_T(t)$, correspondem às deformações das barras nas secções de contacto com o provete, que, no caso de serem do mesmo material e secção, se relacionam entre si através da seguinte expressão.

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (23)$$

6.6.2 Descrição da câmara de alta velocidade

O interesse despoletado pela capacidade da técnica DIC conduziu à sua rápida aplicação em inúmeras áreas, sendo os ensaios de alta velocidade uma destas aplicações, que tendem a aumentar com o desenvolvimento das tecnologias de registo de imagem [60]. As primeiras câmaras de alta velocidade usavam um prisma rotativo, que projetava as imagens para um filme fotossensível. Com o desenvolvimento da tecnologia surgiram os

sensores digitais CCD e mais recentemente CMOS, que possibilitaram diferentes abordagens na metodologia do registo das imagens [60].

A primeira abordagem aproveita o conceito original do prisma rotativo, com a projeção das imagens para diversos sensores digitais. Alternativamente ao prisma rotativo pode ser utilizado um divisor de feixe ótico [60].

A segunda abordagem segue o princípio de funcionamento das câmaras comuns que utilizam somente um sensor, contudo, as elevadas frequências de aquisição só são exequíveis com o aumento da sensibilidade do sensor e das taxas de transferência de informação para a memória [60].

Atualmente, existe uma terceira alternativa que permite aumentar a frequência de aquisição na ordem dos milhões de imagens por segundo (*fps*), denominada *in Situ Storage Image Sensors (ISIS)*, que, como o nome sugere, cada píxel do sensor possui memória ultrarrápida diretamente integrada, o que permite aumentar consideravelmente a transmissão de informação [60].

A câmara utilizada nestes ensaios é a Photron FASTCAM Mini AX 200, com uma resolução máxima de 1024 x 1024 píxeis a 6400 *fps* e que pode chegar a taxas de 900 000 *fps* para resoluções inferiores, possui 16 gigabytes de memória interna e um sensor monocromático com elevada sensibilidade (ISO 40 000) [61].

6.6.3 Provetes e fabrico do padrão *speckle*

Os provetes em liga de alumínio 6063 possuem as dimensões de 18x6x2 milímetros e uma geometria adequada para a sua fixação na barra de Hopkinson, tendo sido fabricados quatro provetes ensaiados à tração, ver Anexo 1 - Dimensões dos provetes para alta velocidade. De modo a permitir a medição do campo de deformações produzido pelo ensaio a elevadas taxas de deformação, foram fabricados padrões *speckle* pelo processo de transferência por adesão em 3 dos provetes, tendo sido aplicada previamente uma camada de tinta branca para realçar o contraste. No quarto provete foi aplicado um padrão *speckle* produzido por aerografia fabricado no laboratório LOME. Na Figura 61 são apresentadas as imagens dos quatro provetes após a aplicação do padrão de *speckle*.

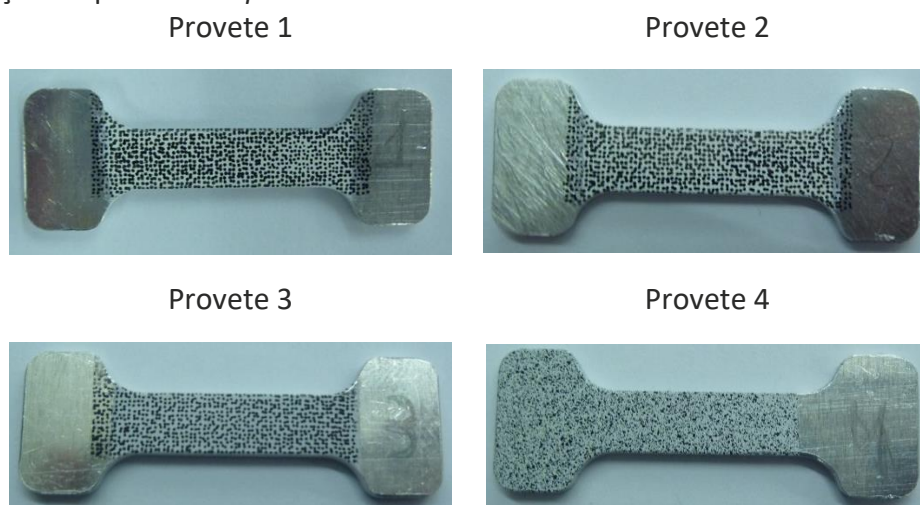


Figura 61 – Provetes utilizados nos ensaios a elevadas taxas de deformação.

6.6.4 Descrição dos ensaios

Por forma a realizar os ensaios a elevadas taxas de deformação e a captura das várias imagens a uma taxa fixa é necessário utilizar uma câmara de alta velocidade com elevada taxa de aquisição e tempos de exposição muito reduzidos. Tal situação requer o uso de iluminação adequada e constante durante todo o ensaio para visualização da superfície dos provetes [62]. Esta iluminação foi criada com recurso a quatro lanternas de iluminação LED com sistema de focagem, Figura 58, o que permitiu atingir tempos de exposição de $0,416 \mu\text{s}$, filmar a uma taxa de 120 000 imagens por segundo (*fps*) e com uma resolução de 384×96 píxeis.

As filmagens de alta velocidade requerem os mesmos cuidados de alinhamento da câmara, ajuste da iluminação e definição da aquisição descritos anteriormente para o ensaio quase-estático. A aquisição das imagens é realizada através do programa Photron Fastcam Viewer 4 disponibilizado pelo fabricante da câmara, o qual permite ajustar diferentes parâmetros. Este permite adquirir uma sequência de imagens em *looping* e que é interrompido após o ensaio, ficando as imagens na memória da câmara. As imagens selecionadas são transferidas e gravadas em computador com a finalidade de serem processadas pela técnica DIC.

6.6.5 Resultados

O ensaio de tração a elevadas taxas de deformação transforma-o num sistema adiabático que conduz ao rápido aumento da temperatura no provete. Por esse motivo, verificou-se o desprendimento do padrão de *speckle* da superfície durante o ensaio em alguns provetes, o que inviabilizou a sua análise através da técnica DIC.

Na Figura 62 são apresentadas as imagens de dois destes provetes após a realização dos ensaios, sendo que, no provete da Figura 62 a) foi aplicada uma tinta para alta-temperatura, em que não se verificou desprendimento do padrão de *speckle*. Já no provete da Figura 62 b) foi aplicada uma tinta *standard*, o que resultou no desprendimento do padrão.

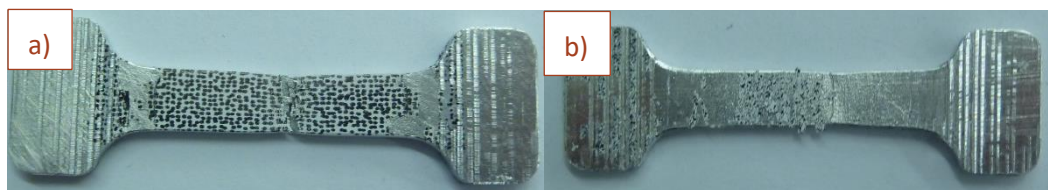


Figura 62 – Imagens dos provetes após o ensaio de tração: a) sem desprendimento do padrão; b) com desprendimento do padrão.

Na Figura 63 é visível o campo de deformações calculado para os provetes 1 e 2 no momento imediatamente anterior à rutura. Foi selecionada uma dimensão de *subset* de 21 píxeis com espaçamento de 5 píxeis e foi calculada a deformação segundo o eixo longitudinal (YY), na qual é visível que o contraste do padrão *speckle* se degrada na zona

crítica, devido ao alongamento considerável dos grãos pretos. Este efeito reforça a importância da utilização de um padrão *speckle* altamente contrastado.

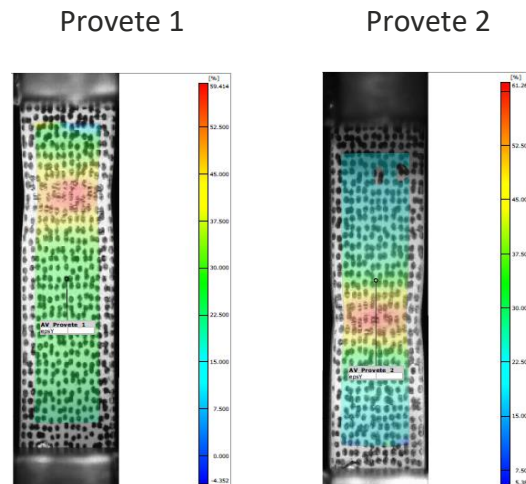


Figura 63 – Campo de deformações na direção axial dos provetes: - Provete 1; - Provete 2.

A partir da análise das deformações medidas nos dois extensômetros elétricos, montados na barra de entrada e saída, são determinadas as curvas tensão-deformação, que se apresentam na Figura 64, e que são comparadas com as obtidas pela técnica de DIC, através do processamento das imagens e tendo como referência o comprimento dos provetes.

Nesta, é possível observar que as curvas apresentam um comportamento muito semelhante, o que atesta da capacidade da técnica DIC para análise do comportamento dos materiais a elevadas taxas de deformação.

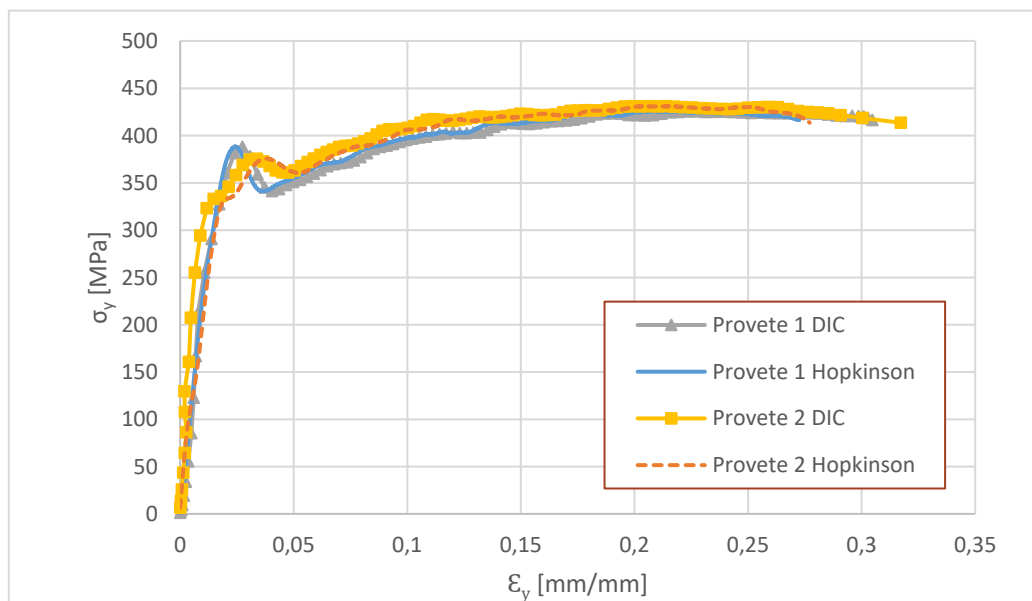


Figura 64 - Curvas tensão-deformação obtida em ensaios de tração a elevadas taxas de deformação.

Adicionalmente, é possível extrair um conjunto de parâmetros relevantes para o estudo do comportamento dos materiais, um exemplo disto é a taxa de deformação do provete imposta pelo ensaio de tração. A partir da Figura 65 é possível identificar que a barra de Hopkinson impõe uma taxa de deformação constante próxima de 500 ((mm/mm) /s). Ainda na mesma figura, observa-se que os resultados obtidos pela técnica DIC seguem os valores registados pelos extensómetros, apesar de algum desfasamento temporal.

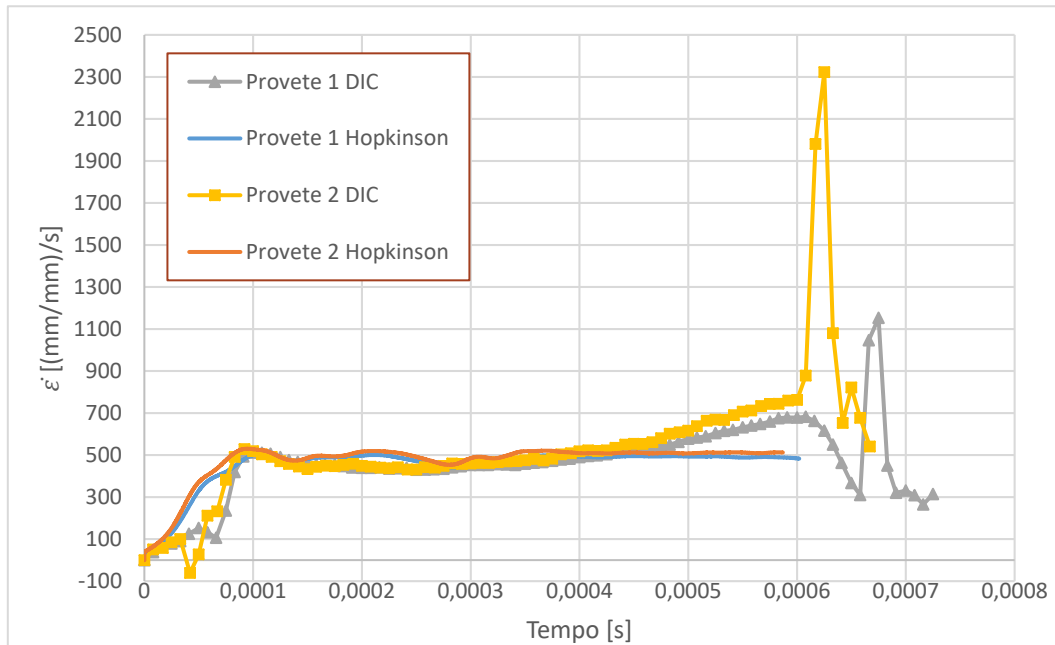


Figura 65 – Taxa de deformação registada nos ensaios em barra de Hopkinson.

A realização dos ensaios a elevadas taxas de deformação permitiu identificar os fatores preponderantes para o sucesso da medição com a técnica DIC. O fator com maior impacto é o tipo de tinta base utilizada no fabrico do padrão *speckle*. Para que este resista às elevadas temperaturas geradas pelo ensaio, a tinta deve possuir boas propriedades de adesão, uma elevada elasticidade e resistência a altas temperaturas. A utilização de uma iluminação adequada também é fundamental para se obter imagens fixas com elevado contraste e essencial para se alcançar elevada precisão na medição.

CONCLUSÕES

- 7.1 Conclusões
- 7.2 Propostas para trabalhos futuros

7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo sumariza as conclusões resultantes do desenvolvimento do presente trabalho, a partir dos quais são apresentadas as propostas para trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

O crescente interesse pela técnica de correlação digital de imagem nos últimos anos, evidenciado pelo número crescente de artigos publicados, motivou o desenvolvimento de um sistema de correlação digital dedicado à medição dos campos de deslocamento e deformação no plano, o qual é apresentado ao longo deste trabalho. A possibilidade de construir um sistema de baixo custo, com elevada flexibilidade e usando o equipamento existente, incentivaram o desenvolvimento do sistema de correlação de imagem.

Na persecução dos objetivos traçados, foi, primeiramente, realizada uma vasta pesquisa bibliográfica sobre o atual estado de arte desta técnica. Através desta revisão, são descritos os principais desenvolvimentos da técnica, o seu princípio de funcionamento e utilização, bem como, a identificação das suas principais características.

Um fator que contribuiu significativamente para a melhoria das imagens captadas foi o programa de aquisição desenvolvido no âmbito deste trabalho. A inclusão de ferramentas de calibração permite assegurar que as imagens estão devidamente focadas em toda a região de interesse, visualizar a uniformidade da iluminação incidente na superfície e avaliar o ruído presente nas imagens. De entre as várias ferramentas implementadas destaca-se o histograma, o qual permite, entre outras funções, observar o nível de saturação das imagens, a distribuição de intensidades e avaliar a gama dinâmica na imagem.

A qualidade do padrão *speckle* é avaliado através de um conjunto de parâmetros como o MIG, o MSF e a entropia. Através da análise destes parâmetros é possível ajustar o sistema de modo a maximizar a qualidade das imagens registadas e, assim, obter medições com elevada precisão. Neste âmbito, o tamanho dos grãos de *speckle* têm um papel fundamental, os quais devem possuir idealmente uma dimensão entre 2 a 5 píxeis, pelo que foi desenvolvida uma ferramenta que permite caracterizar a distribuição e dimensão destes grãos na imagem.

Por forma a maximizar a gama dinâmica do sinal, foi desenvolvido um programa para o pré-processamento das imagens adquiridas, através da conversão da escala de 12 bits para 8 bits e definição da banda de intensidades. Assim, é possível melhorar a qualidade das imagens adquiridas em condições adversas de medição. O padrão de *speckle* deve apresentar um contraste elevado, uma aleatoriedade de 70 %, ser isotrópico, uma razão de cobertura de 50 %, excelente aderência e boa estabilidade geométrica. Para o fabrico de padrões de *speckle*, existem diferentes processos de fabrico, os quais podem ser classificados em nano/micro ou macro. Os processos de fabrico macro foram analisados em detalhe, por serem os mais adequados para este trabalho. Destes, destaca-se o

processo de fabrico de transferência por adesão, pela simplicidade do processo, por permitir o controlo dimensional dos grãos e da sua distribuição espacial, obter padrões com elevada qualidade e fabricar padrões a um custo reduzido. Foram analisados diversos programas dedicados à correlação digital de imagem, tendo sido identificados os programas da *GOM Correlate* e *VIC-2D* como os que possuem as melhores características.

Para a construção do sistema de correlação de imagem foi selecionada uma lente *Kowa*[®], por apresentar a melhor resolução e baixas distorções de imagem. Os ensaios experimentais foram realizados na máquina de tração usando provetes em alumínio, de modo a validar todo o sistema de aquisição e pré-processamento das imagens. Através da comparação dos resultados obtidos pela técnica DIC com os do extensómetro mecânico, verificaram-se erros na extensão inferiores a 10% para valores superiores a 30 micrómetros de extensão. Os vários programas DIC produziram resultados muito semelhantes para a deformação do provete, pelo que o programa da *GOM Correlate* foi selecionado para futuras análises, por apresentar as características mais adequadas às aplicações realizadas no âmbito deste trabalho.

A fim de avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foram analisados os gradientes dos perfis das deformações ao longo da secção transversal em provetes com furo central, os quais foram comparados com os valores de referência obtidos pelo MEF. Estes permitiram identificar desvios significativos para baixas taxas de deformação, os quais foram observados para o provete com furo de 3 mm, justificado, principalmente, pela baixa razão sinal-ruído, baixa resolução espacial da medição e simplificação das propriedades do material usadas na simulação numérica. Por outro lado, foi observada uma melhoria nos resultados para diâmetros de furos superiores, justificados pelo maior nível de deformações geradas. Daqui, conclui-se que o aumento da resolução espacial da medição permite determinar com maior rigor a deformação em pequenas regiões. Foram igualmente observados movimentos de corpo rígido dos provetes durante a fase inicial do ensaio, que afetaram a qualidade dos resultados obtidos pela técnica DIC.

Para além dos ensaios quase-estáticos, foram realizados ensaios exploratórios a elevadas taxas de deformação, usando uma barra de Hopkinson. Estes permitiram, com sucesso, caracterizar o comportamento da liga de alumínio à tração, demonstrando a versatilidade e a robustez desta técnica. Através destes ensaios, foi possível identificar a relevância de uma iluminação adequada para obter imagens com elevado contraste, mas também as características requeridas à tinta usada nos provetes, que deve possuir uma boa adesão às elevadas temperaturas provocadas pelas elevadas taxas de deformação.

Em suma, para obtenção de medições com distinta qualidade, deve ter-se em consideração as características da câmara e da lente utilizada na recolha das imagens, a qualidade do padrão de *speckle* aplicado à superfície, os parâmetros usados na aquisição das imagens, o tipo e nível de iluminação e os parâmetros do processamento das imagens pelos programas de correlação.

7.2 Propostas para trabalhos futuros

O trabalho supramencionado destaca algumas das dificuldades inerentes à técnica de correlação digital de imagem. Consequentemente, recomenda-se a realização de trabalhos complementares para avaliar a precisão, a resolução desta técnica e, se necessário, desenvolver ferramentas adicionais que permitam ultrapassar algumas das limitações identificadas.

Assim sendo, são indicados alguns pontos de interesse para trabalhos futuros:

- Desenvolver um sistema para garantir o alinhamento dos provetes a ensaiar na máquina de tração;
- Utilizar a ferramenta de calibração das lentes para extrair os coeficientes de distorção, e introduzir no programa de pré-processamento desenvolvido, com o intuito de corrigir as distorções nas imagens;
- Realizar uma bateria de testes num ensaio de precisão, com o intuito de determinar a sensibilidade do sistema e a influência de todas as variáveis associadas à câmara;
- Estudar a aplicação de filtros nas imagens e avaliar o seu impacto nos resultados;
- Avaliar as melhorias na razão sinal-ruído pela aplicação de médias temporais às imagens adquiridas;
- Aferir a possibilidade de melhorar o nível de contraste das imagens com a utilização de diferentes tintas;
- Averiguar as vantagens e desvantagens da aquisição das imagens à taxa máxima de aquisição da câmara e, posteriormente, realizar a seleção das imagens pretendidas.
- Efetuar uma nova análise comparativa entre o DIC e o MEF, utilizando um modelo multilinear para a definição das propriedades do material.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

8.1 Artigos, livros, teses e páginas de *internet*

8 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

8.1 Artigos, livros, teses e páginas de *internet*

- [1] P. Newby, "The Photogrammetric Record: Editorial," *Photogrammetric Record*, 2005. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/14779730>. [Accessed: 28-Sep-2019].
- [2] A. Duerer, "Short Chronological History of Photogrammetry," *Proc. of XIII Congr. Int. Soc. for. Photogramm.*, pp. 1–36, 1977.
- [3] M. Sutton, J.-J. Orteu, and H. W. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications*. 2009.
- [4] P. Reu, "THE ART AND APPLICATION OF DIC: A Revolution in Experimental Mechanics," vol. 39, no. Dic, pp. 1–2, 2015.
- [5] W. H. Peters and W. F. Ranson, "Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis," *Opt. Eng.*, 2012.
- [6] M. A. Sutton, W. J. Wolters, W. H. Peters, W. F. Ranson, and S. R. McNeill, "Determination of displacements using an improved digital correlation method," *Image Vis. Comput.*, vol. 1, no. 3, pp. 133–139, 1983.
- [7] Y. Morimoto and M. Fujigaki, *Automated analysis of 3-D shape and surface strain distributions of a moving object using stereo vision*, vol. 18. 1993.
- [8] Y. J. Chao, *Application of stereo vision to three-dimensional deformation analyses in fracture experiments*, vol. 33. 1994.
- [9] W. G. Knauss, I. Emri, and H. Lu, "Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics," 2008, pp. 49–95.
- [10] B. Pan, "Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 8, 2018.
- [11] B. Pan, L. Yu, and Q. Zhang, *Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement*, vol. 61. 2017.
- [12] P. Reu, "All about speckles: Speckle density," *Exp. Tech.*, vol. 39, no. 3, pp. 1–2, 2015.
- [13] P. Reu, "All about speckles: Speckle Size Measurement," *Exp. Tech.*, vol. 39, no. 3, pp. 1–2, 2015.
- [14] P. Reu, "All about speckles: Edge sharpness," *Exp. Tech.*, vol. 39, no. 2, pp. 1–2, 2015.
- [15] P. Reu, "All about speckles: Aliasing," *Exp. Tech.*, vol. 38, no. 5, pp. 1–3, 2014.

- [16] B. Pan, K. Qian, H. Xie, and A. Asundi, "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 6, p. 62001, 2009.
- [17] Correlated Solutions, "Application Note AN -1701 Speckle Pattern Fundamentals," *Speckle Pattern Fundam.*, 2017.
- [18] Y. L. Dong and B. Pan, "A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation," *Exp. Mech.*, vol. 57, no. 8, pp. 1161–1181, 2017.
- [19] P. Moreira, "Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação Digital de Imagem para Avaliação de Grandes Deformações," 2015.
- [20] "Imagem RGB." [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/matlab-rgb-image-representation/>. [Accessed: 25-May-2019].
- [21] C. A. Beleza, "Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem," 2017.
- [22] P. Reu, "Stereo-rig design, Part 2 - Camera selection," *Exp. Tech.*, vol. 36, no. 6, pp. 3–4, 2012.
- [23] J. F. S. Gomes, *Mecânica dos Sólidos e Resistência dos Materiais*. Porto: INEGI, 2004.
- [24] J. William N. Sharpe, *Experimental Solid Mechanics*. Baltimore: Springer, 2008.
- [25] P. Reu, "Hidden components of 3D-DIC: Interpolation and matching - Part 2," *Exp. Tech.*, vol. 36, no. 3, pp. 3–4, 2012.
- [26] C. Quentin Davis and D. M. Freeman, *Statistics of subpixel registration algorithms based on spatiotemporal gradients or block matching*, vol. 37. 1998.
- [27] P. Reu, "Stereo-rig design: Creating the STEREO-RIG LAYOUT - PART 1," *Exp. Tech.*, vol. 36, no. 5, pp. 3–4, 2012.
- [28] P. Reu, "All about speckles: Contrast," *Exp. Tech.*, vol. 39, no. 3, pp. 1–2, 2015.
- [29] P. Reu, "Hidden Components of DIC: Calibration and Shape Function—Part 1," vol. 36, pp. 3–5, 2012.
- [30] X.-Y. Liu *et al.*, "Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation by Shannon entropy," *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 126, no. 23, pp. 4206–4211, 2015.
- [31] T. Hua, H. Xie, S. Wang, Z. Hu, P. Chen, and Q. Zhang, "Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation," *Opt. Laser Technol.*, 2011.
- [32] B. Pan, Z. Lu, and H. Xie, "Mean intensity gradient: An effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 4, pp. 469–477, 2010.
- [33] G. Practices and U. Quanti, "A Good Practices Guide for Digital Image Correlation Standardization and Uncertainty Quantiication Committee," 2018.

- [34] T. E. J. Edwards, F. Di Gioacchino, H. P. Springbett, R. A. Oliver, and W. J. Clegg, "Stable Speckle Patterns for Nano-scale Strain Mapping up to 700 ° C," vol. 1, pp. 1469–1482, 2017.
- [35] C. Solutions, "Testing Guide VIC-2D v6." [Online]. Available: www.correlatedSolutions.com. [Accessed: 05-Mar-2019].
- [36] C. Solutions, "VIC Correlations." [Online]. Available: <https://www.correlatedsolutions.com/speckle-kit/>. [Accessed: 24-May-2019].
- [37] P. Mazzoleni, E. Zappa, F. Matta, and M. A. Sutton, "Thermo-mechanical toner transfer for high-quality digital image correlation speckle patterns," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 75, pp. 72–80, 2015.
- [38] "A New Method of Creating High-Temperature Speckle Patterns and Its Application in the Determination of the High-Temperature Mechanical Properties of Metals," *Exp. Tech.*, vol. 42, no. 5, pp. 523–532, 2018.
- [39] Z. Chen, C. Quan, F. Zhu, and X. He, "A method to transfer speckle patterns for digital image correlation," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 9, 2015.
- [40] Z. Gao, X. Xu, Y. Su, and Q. Zhang, "Experimental analysis of image noise and interpolation bias in digital image correlation," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 81, pp. 46–53, 2016.
- [41] "DIC softwares," *INTERNATIONAL DIGITAL IMAGE CORRELATION SOCIETY*. [Online]. Available: <http://idics.org/resources/>. [Accessed: 12-Sep-2019].
- [42] M. A. Sutton, J. J. Orteu, H. W. Schreier, and P. Reu, "Introduction to digital image correlation: Best practices and applications," *Exp. Tech.*, vol. 36, no. 1, pp. 3–4, 2012.
- [43] "Ncorr Download." [Online]. Available: <http://www.ncorr.com/index.php/downloads>. [Accessed: 26-Jun-2019].
- [44] D. Image and C. Matlab, "GitHub - justinblaber/ncorr_2D_matlab: 2D Digital Image Correlatio," 2018. [Online]. Available: https://github.com/justinblaber/ncorr_2D_matlab. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [45] J. Blaber and A. Antoniou, "Ncorr - Instruction Manual Version 1.2.2-master," p. 55, 2017.
- [46] I. Correlated Solutions, "Correlated Solutions, Inc," 2008. [Online]. Available: http://www.correlatedsolutions.com/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=27. [Accessed: 12-Jul-2019].
- [47] "DICe features." [Online]. Available: <https://github.com/dicengine/dice>.
- [48] "Digital Image Correlation engine (DICe)," *Github*. [Online]. Available: <https://github.com/dicengine/dice>. [Accessed: 17-Jun-2019].
- [49] P. Reu, "Stereo-rig design: Lens selection - Part 3," *Exp. Tech.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–3, 2013.
- [50] "1951 USAF Resolution Test Chart." [Online]. Available:

- https://en.wikipedia.org/wiki/1951_USAF_resolution_test_chart. [Accessed: 05-Jul-2019].
- [51] P. Reu, "Calibration: 2D Calibration," *Exp. Tech.*, vol. 37, no. 5, pp. 1–2, 2013.
- [52] A. Mg and A. Aluminum, "Identification Aluminum , 5754 , wrought , O Durability : flammability Durability : fluids and sunlight Material processing : energy Material processing : CO2 footprint."
- [53] I. P. da Qualidade, "NORMA NP EN 10002-1 2006_ENSAIOS DE TRACÇÃO.pdf." Instituto Portugues da Qualidade, Caparica, p. 58, 2006.
- [54] P. Reu, "Points on Paint," *Exp. Tech.*, vol. 39, no. 4, pp. 1–2, 2015.
- [55] P. Reu, "Calibration: Pre-Calibration Routines," *Exp. Tech.*, vol. 37, no. 4, pp. 1–2, 2013.
- [56] P. Reu, "Calibration: A good calibration image," *Exp. Tech.*, vol. 37, no. 6, pp. 1–3, 2013.
- [57] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10th ed. McGraw-Hill Education, 2015.
- [58] P. Reu, "Virtual Strain Gage Size Study," *Exp. Tech.*, vol. 39, no. 5, pp. 1–3, 2015.
- [59] J. M. C. F. Justo, "Estudo do Comportamento ao Impacto de Alta Velocidade de Estruturas em Materiais Compósitos," 2005.
- [60] P. L. Reu and T. J. Miller, "The application of high-speed digital image correlation," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 43, no. 8, pp. 673–688, 2008.
- [61] P. Reu, "Speckles and their relationship to the digital camera," *Exp. Tech.*, vol. 38, no. 4, pp. 1–2, 2014.
- [62] P. Reu, "Stereo-rig Design : Lighting — Part 5," vol. 37, pp. 1–2, 2013.

ANEXOS

- 9.1 Anexo 1 - Dimensões dos provetes para alta velocidade
- 9.2 Anexo 2 - Curva bilinear
- 9.3 Anexo 3 - Padrão *speckle*
- 9.4 Anexo 4 - Fluxograma
- 9.5 Anexo 5 - Programa de aquisição
- 9.6 Anexo 6 - Programa de pré-processamento

9 ANEXOS

9.1 Anexo 1 - Dimensões dos provetes para alta velocidade

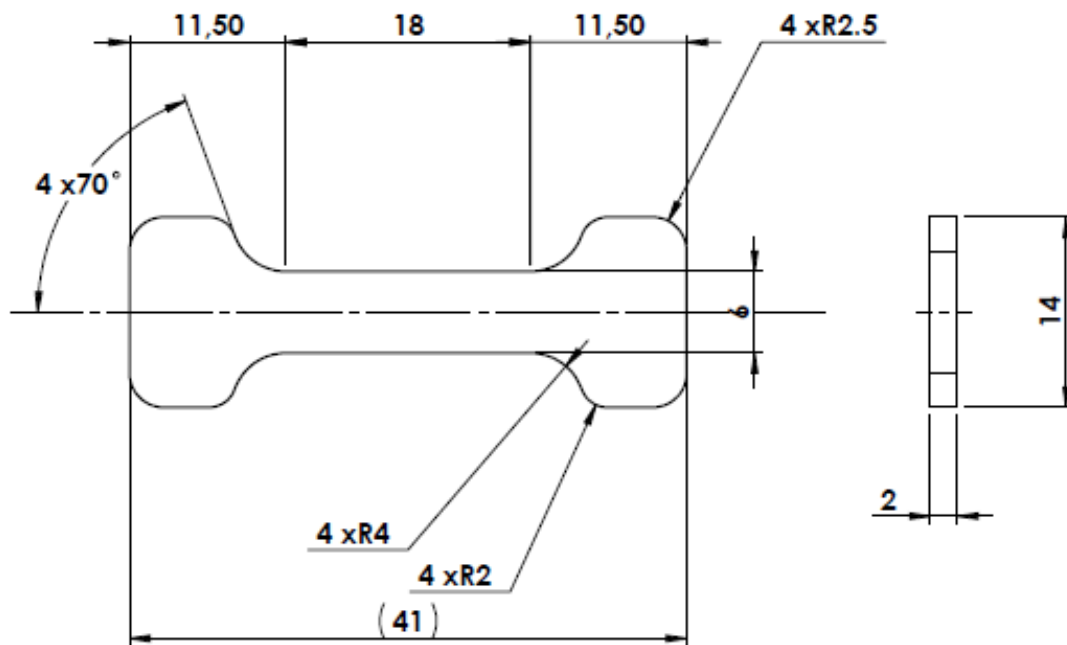


Figura 66 – Desenho técnico dos provetes utilizados nos ensaios de alta velocidade (desenho fornecido pelo INEGI).

9.2 Anexo 2 - Curva bilinear

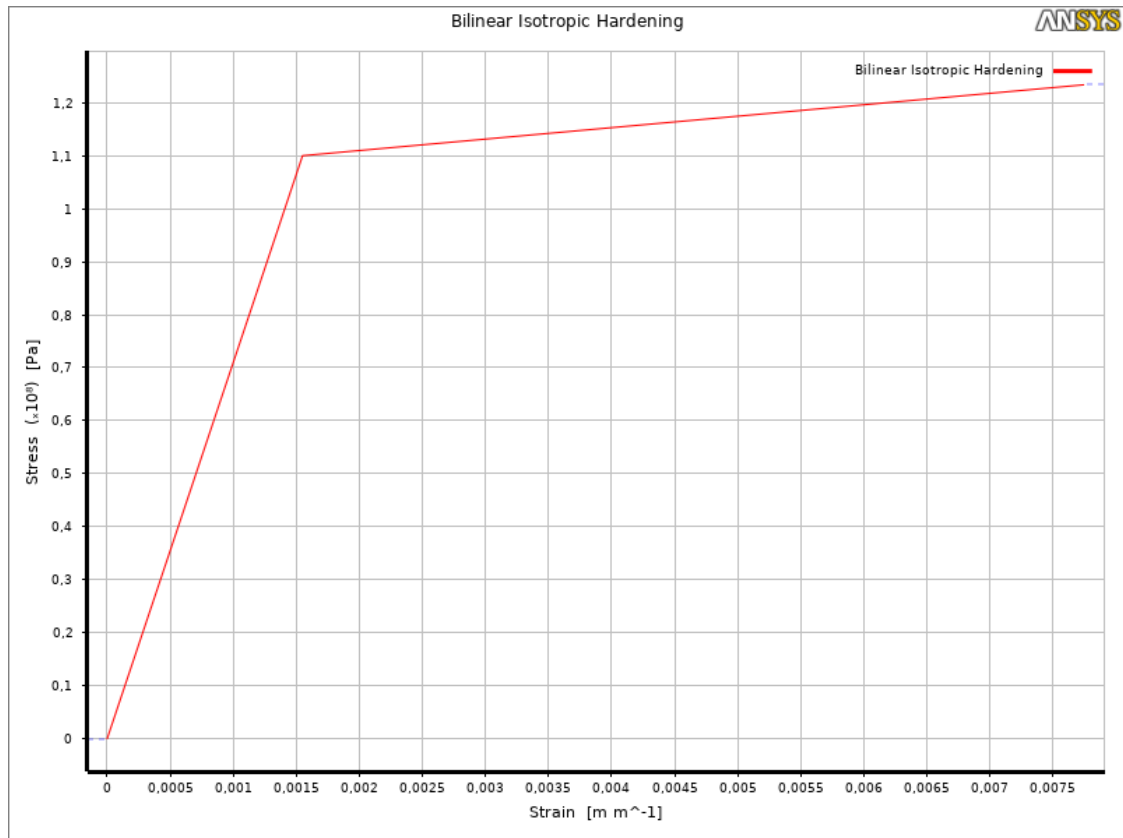


Figura 67 – Curva bilinear que define as propriedades mecânicas dos provetes simulados.

9.3 Anexo 3 - Padrão *speckle*

Procedimento de fabrico do padrão *speckle* pela técnica de transferência por adesão.

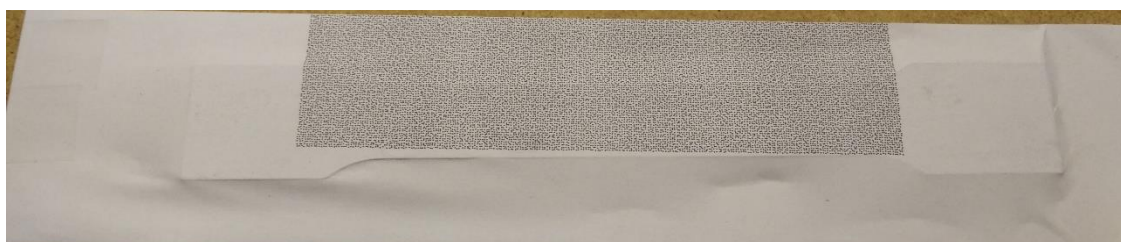
1º - Material utilizado no fabrico dos padrões *speckle*;



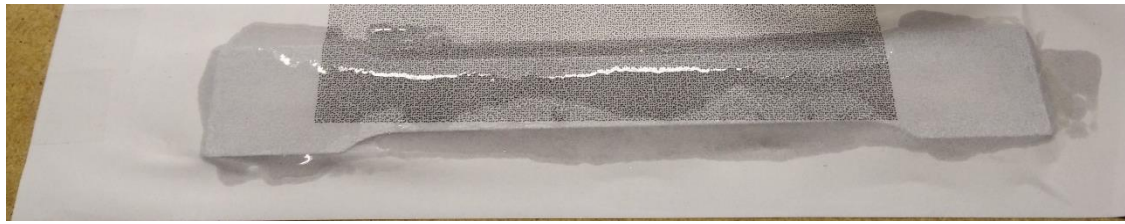
2º - Aplicação do adesivo na superfície do provete e na superfície do padrão;



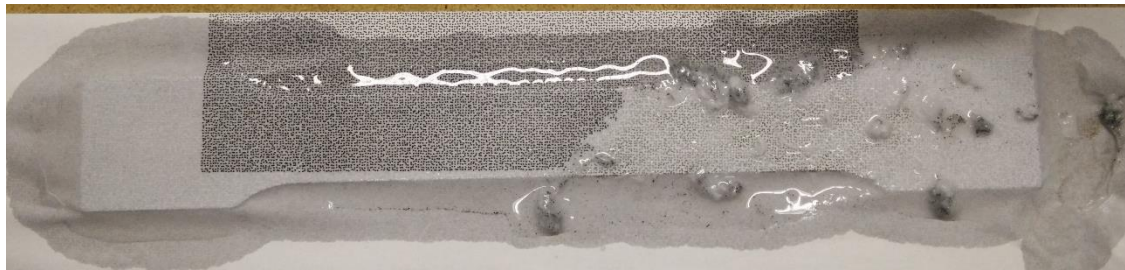
3º - Sobreposição do padrão no provete e aplicação de pressão;



4º - Aplicação de água para humidificar o papel;



5º - Remoção do papel utilizado como meio de transferência do padrão;



6º - Secagem do padrão *speckle* obtido;

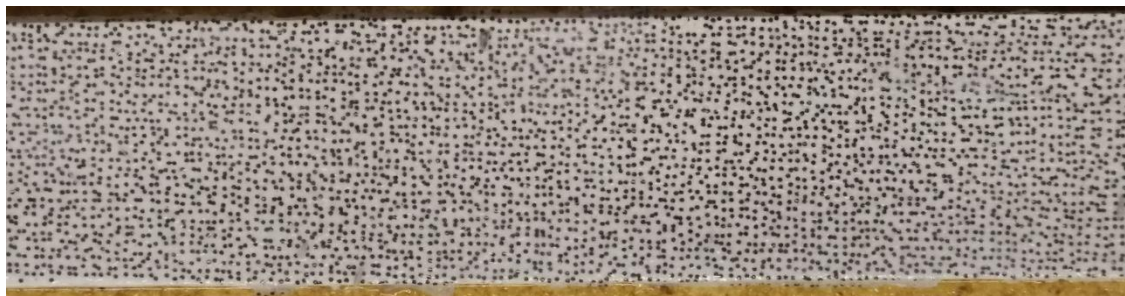
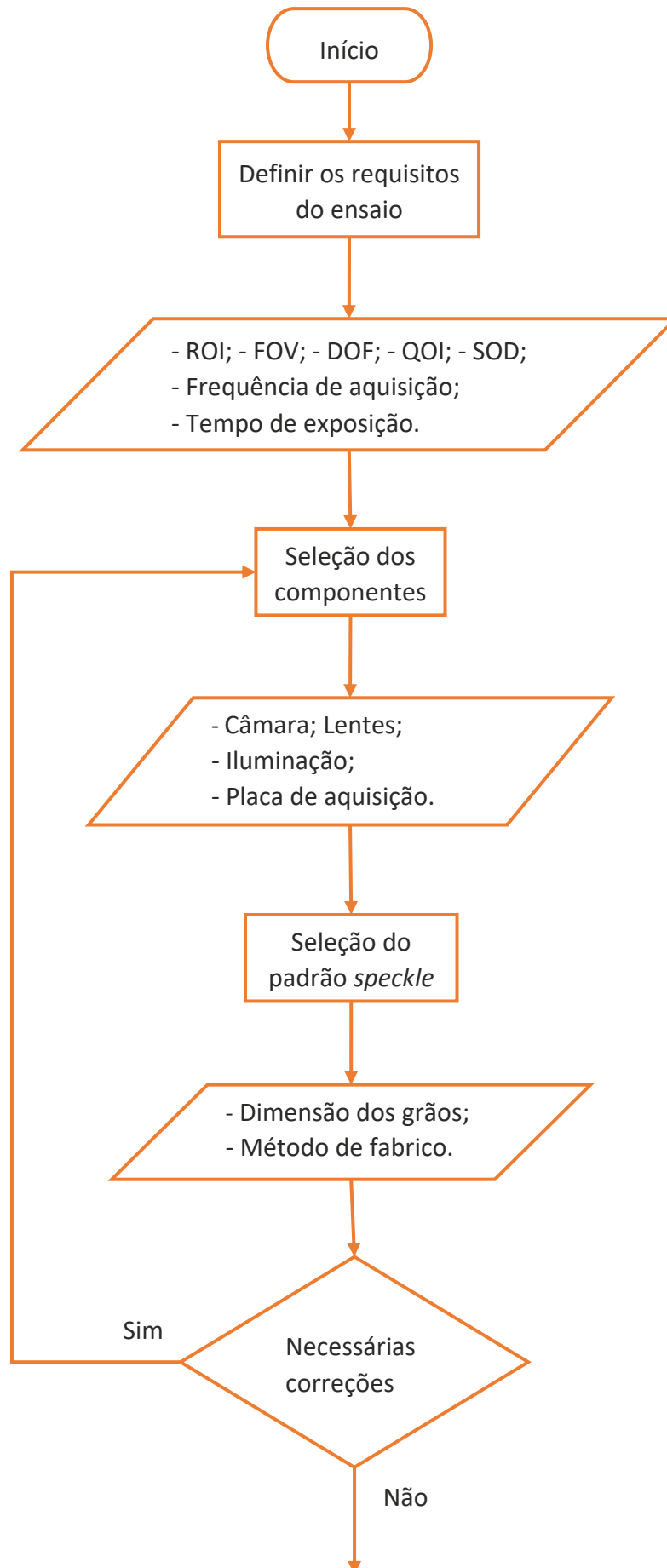
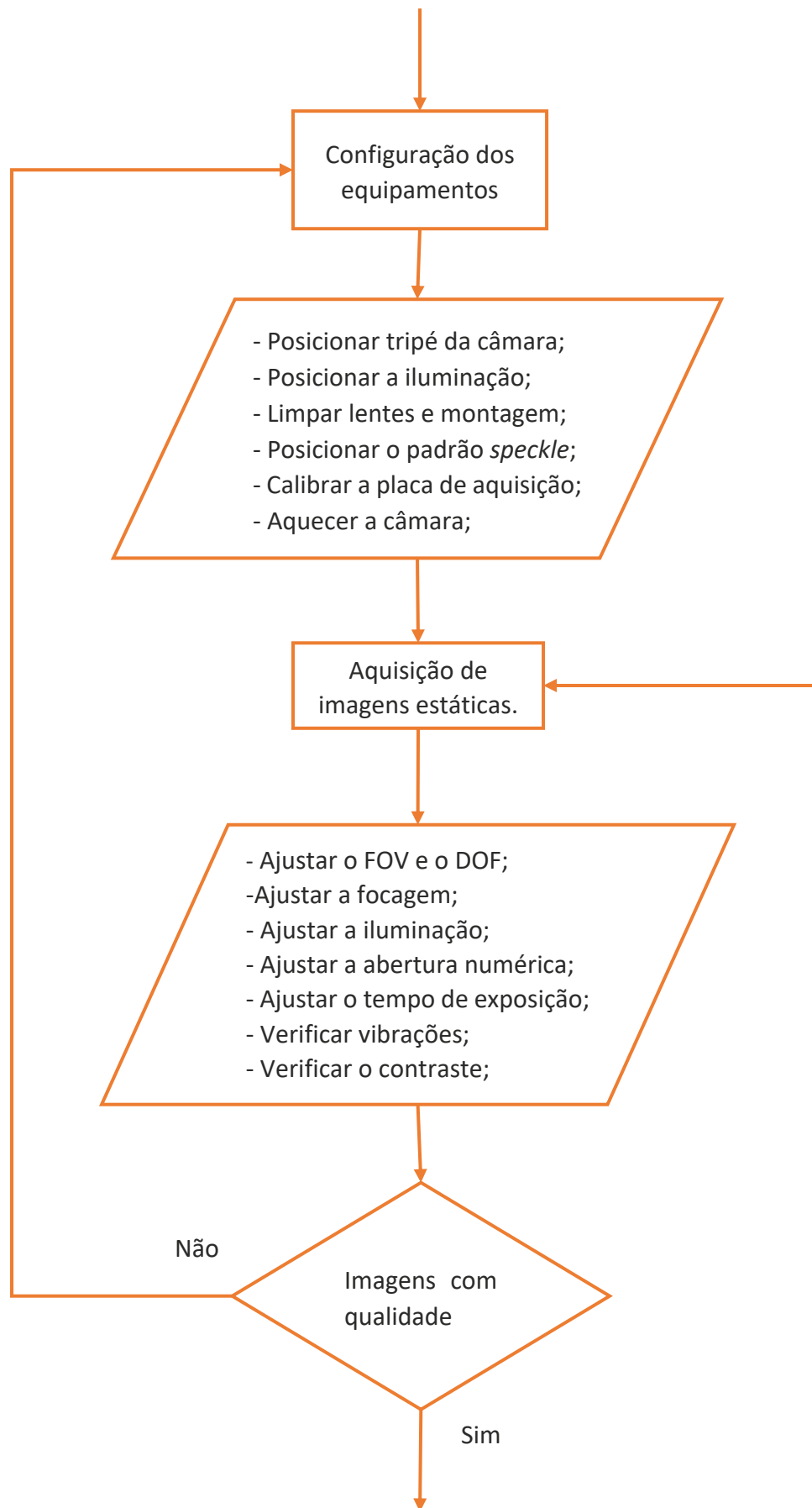


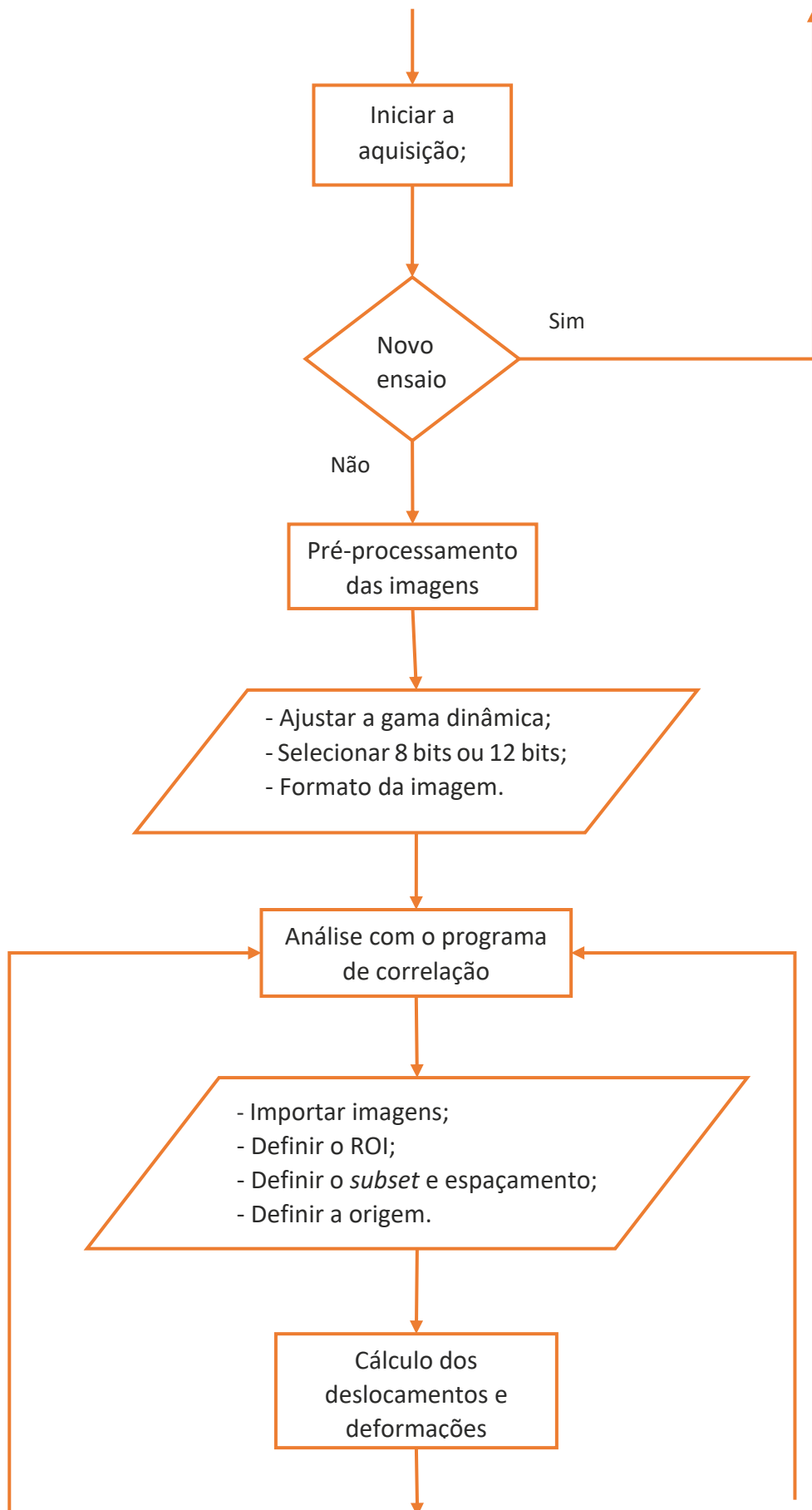
Figura 68 – Etapas do processo de fabrico de um padrão *speckle* pela transferência por adesão.

9.4 Anexo 4 - Fluxograma

Fluxograma com a sequência de etapas necessárias à análise da correlação digital de imagem.







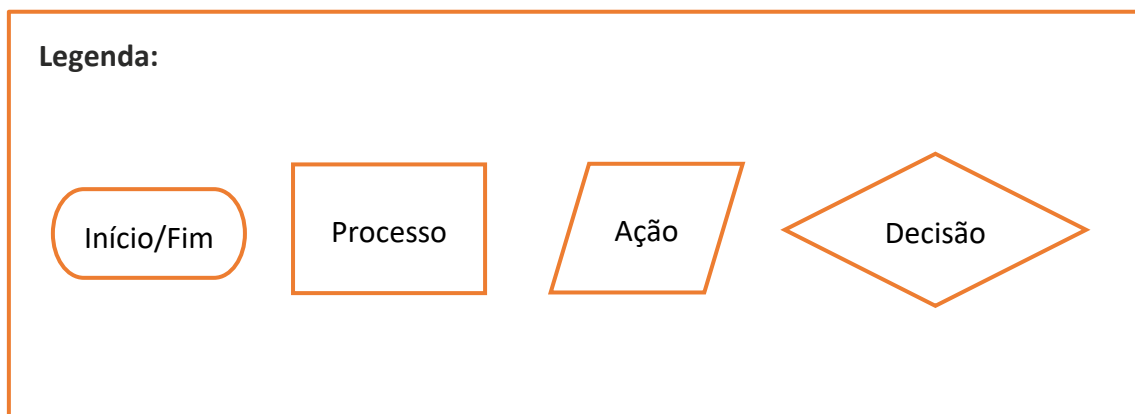
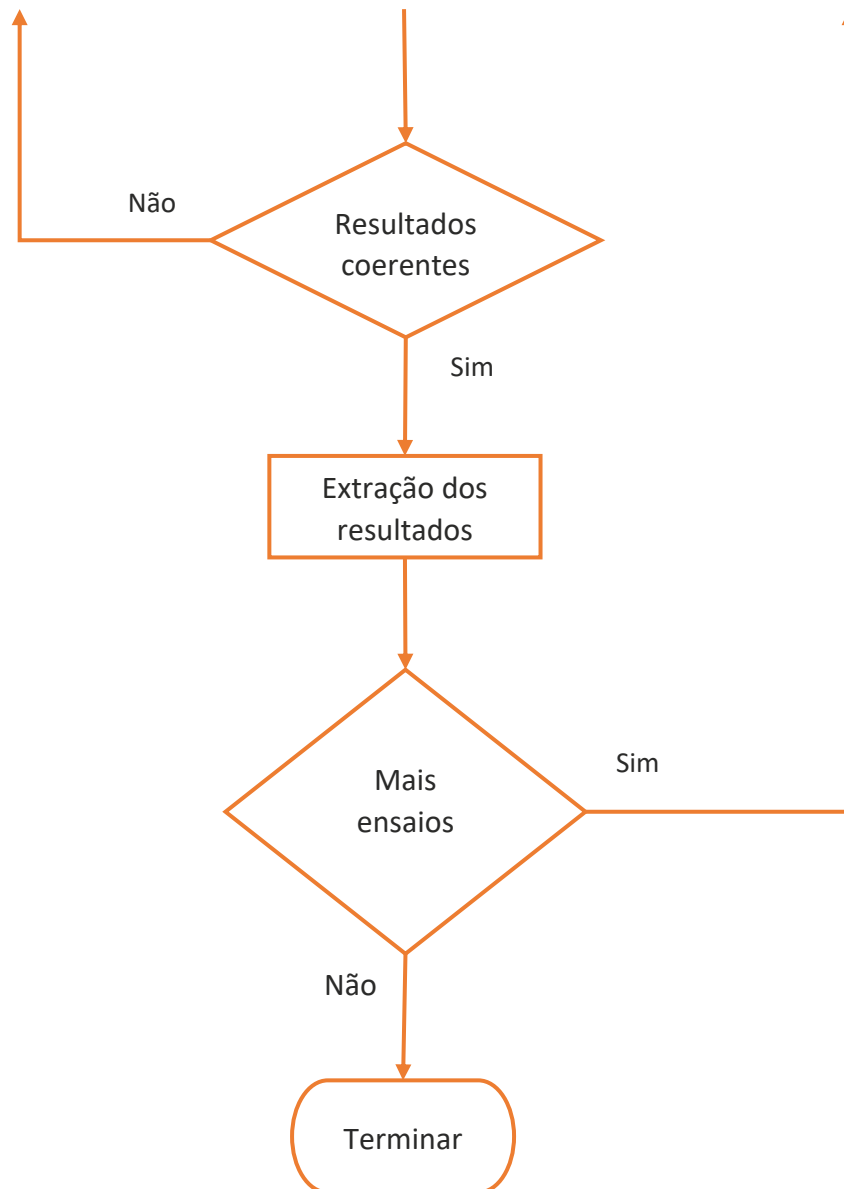


Figura 69 – Fluxograma das etapas para implementação da técnica DIC

9.5 Anexo 5 - Programa de aquisição

Código MatLab® referente ao programa de aquisição desenvolvido.

```
function varargout = DIC_acquisition_v16(varargin)
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn', @DIC_acquisition_v16_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn', @DIC_acquisition_v16_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn', [], ...
'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
[varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before DIC_acquisition_v16 is made visible.
function DIC_acquisition_v16_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
global d vid
d=0;
clc;
try isempty(vid);
vid= videoinput('gentl', 1, 'Mono12');
src = getselectedsource(handles.vid);
src.GainAuto = 'Off';
src.Gain = 0;
src.Gamma = 1;
src.BlackLevel =0;
src.ExposureTime =8000;
src.DeviceLinkThroughputLimit = 419430400;
%%
triggerconfig(vid,'Manual');
set(vid, 'ReturnedColorSpace', 'grayscale', 'FramesPerTrigger',1,'TriggerRepeat',inf);
catch
end
try load('path.mat')
catch
pathname=pwd;
save path.mat pathname
end
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.

function varargout = DIC_acquisition_v16_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
% -----
function Close_Callback(hObject, eventdata, handles)
global d vid;
selection = questdlg('Are you sure?', 'Close Program?', 'Yes', 'No', 'Yes');
if strcmp(selection, 'No')
```

```

return;
elseif d==1
Stop_Callback(hObject, eventdata, handles);
return;
end
stop(vid);delete(vid);
delete(handles.figure1)
% -----
function Image_Calibration_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
function Acquisition_Callback(hObject, eventdata, handles)
global vid d VForce VPos time_interval
warning off;
if d==1;d=0;stop(vid);return;end
set(handles.text1,'visible','on');
Ni = daq.createSession('ni');Ni.Rate = 1000;
Ni.DurationInSeconds = 0.01;
addAnalogInputChannel(Ni,'Dev3',[0 1], 'Voltage');
Ni.IsContinuous = true;
lh = addlistener(Ni,'DataAvailable',@Nidata);
Ni.startBackground();
%%
answer = inputdlg('Acquisition interval [s]','Input time interval',1,{ '1'});
if ~isempty(answer)
time_interval=str2double(answer);
else
return;
end
load path.mat pathname
[filename, pathname] = uiputfile('*.mat', 'Save file as',pathname);
if ~isequal(filename,0)
name=fullfile(pathname, filename);
name=name(1:end-4);
save path.mat pathname;
else
Stop_Callback(hObject, eventdata, handles);
return;
end
[Im,rect,h1,h2]=STARTVID(vid,handles);
set(handles.axes1,'CLimMode','manual','NextPlot','replacechildren');
%%
h= msgbox('Ready to start','Warning','warn');
uiwait(h);

trigger(vid);
Force_N=VForce/5*100e3; Position_mm=VPos/5*100;
Time_S=0;
tic;
Im=getdata(vid,1,'uint16');Im=imcrop(Im,rect);
save([name '_1.mat'],'Time_S','Force_N','Position_mm','Im','-mat');
set(h1,'CData',Im);
textLabel = sprintf('Frames=%3u\nTime Interval [s]=%2.1f\nTime [s]=%5.3f\nForce [N]=%
5.1f\nPosition [mm]=%3.3f',1,time_interval, Time_S,Force_N,Position_mm);
%%
[countH,x]=imhist(Im,4096);
h2=plot(handles.axes2,x,countH,'linewidth',1.5);
set(handles.axes2,'CLimMode','auto','NextPlot','replacechildren','xlim',[0
4095],'ytick',...
[],'xtick',[0 2048 4095]);title(handles.axes2,'Histogram');
d=1;count=1;

```

```

set(handles.text1, 'String', textLabel);pause(0.1)
while d
if toc>= (time_interval*count)
trigger(vid);
Force_N=VForce/5*100e3;
Position_mm=VPos/5*100;
Time_S=toc;
Im=getdata(vid,1,'uint16');
Im=imcrop(Im,rect);
count=count+1;
save([name '_' num2str(count) '.
mat'],'Time_S','Force_N','Position_mm','Im','-mat');
set(h1,'CData',Im);
[~,Im2]=SUBIMAGE(handles,Im,Im);
[countH,x]=imhist(Im2,4096);
set(h2,'Ydata',countH);
textLabel = sprintf('Frames:=%3u\nTime Interval [s]=%2.1f\nTime [s]=%5.3
f\nForce [N]=%5.1f\nPosition [mm]=%3.3f',count,time_interval, Time_S,Force_N,
Position_mm);
set(handles.text1, 'String', textLabel);
end
end
h= msgbox('Finish','Warning','warn');
uiwait(h);
set(handles.axes1,'NextPlot','replace');
set(handles.axes2,'NextPlot','replace');
delete(lh);
Stopvid(vid,handles);
% ---
function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
Close_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
function Stop_Callback(hObject, eventdata, handles)
global d
d=0;

function Calibration_Callback(hObject, eventdata, handles)
global vid d
if d==1;d=0;stop(vid);return;end;
[Im,rect,h1,h2]=STARTVID(vid,handles);
Hm=gray(256);
Hm(248:256,2:3)=0;Hm(248:256,1)=1;
Hm(248:250,2)=0.4;
Hm(1:10,1:2)=0;Hm(1:10,3)=1;
colormap(handles.axes1,Hm);
set(handles.axes1,'CLimMode','manual','NextPlot','replacechildren');
d=1;
while d==1
ref=Im;
trigger(vid);
Im=getdata(vid,1,'uint16');
Im=imcrop(Im,rect);
DIm=abs(Im-ref);
[DIm2,Im2]=SUBIMAGE(handles,DIm,Im);
[count]=TEXTLABEL(handles,Im2,DIm2);
set(h1,'CData',Im);
set(h2,'Ydata',count);
end
Stopvid(vid,handles);
% -----

```

```

function File_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
function Image_Acquisition_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
function Intensity_Callback(hObject, eventdata, handles)
global vid d
if d==1;d=0;stop(vid);return;end;
[Im,rect,h1,h2]=STARTVID(vid,handles);
colormap(handles.axes1,jet(30));colorbar(handles.axes1);
set(handles.axes1,'CLimMode','auto','NextPlot','replacechildren');
d=1;
while d==1
ref=Im;
trigger(vid);
Im=getdata(vid,1,'uint16');
Im=imcrop(Im,rect);
DIm=abs(Im-ref);
[DIm2,Im2]=SUBIMAGE(handles,DIm,Im);
[count,~]=imhist(Im2,4096);
%%
[count]=TEXTLABEL(handles,Im2,DIm2);
%%
set(h1,'CData',Im); l
set(h2,'Ydata',count);
end
Stopvid(vid,handles)

function Speckle_Quality_Callback(hObject, eventdata, handles)
global vid d
if d==1;stop(vid);d=0;return;end;
[Im,rect,h1,h2]=STARTVID(vid,handles);
colormap(handles.axes1,jet);
colorbar(handles.axes1);
answer = inputdlg('Window size odd [3,5,7,9,11]','Input value',1,{ '11' });
if ~isempty(answer)
W=str2double(answer);
else
Stop_Callback(hObject, eventdata, handles);
return;
end
Hw=ones(W)/W^2;
[count,MIG]=TEXTLABEL2(handles,Im,Im);
Quality=conv2(MIG,Hw,'valid');
set(h1,'CData',Quality);
set(handles.axes1,'CLimMode','auto','NextPlot','replacechildren');
d=1;
while d==1
trigger(vid);
Im=getdata(vid,1,'uint16');
Im=imcrop(Im,rect);
[~,Im2]=SUBIMAGE(handles,Im,Im);
[count,MIG]=TEXTLABEL2(handles,Im2,Im2);
Quality=conv2(MIG,Hw,'valid');
set(h1,'CData',Quality);
set(h2,'Ydata',count);
end
Stopvid(vid,handles)
% -----
function Speckle_Size_Callback(hObject, eventdata, handles)
global vid d

```

```

if d==1;stop(vid);d=0;return;end;
[Im,rect,h1,h2]=STARTVID(vid,handles);
set(handles.axes2,'Nextplot','replace');
hold(handles.axes1,'on');
answer = inputdlg('Threshold level [0.1-0.9]','Input value',1,{0.75});
if ~isempty(answer)
Threshold=str2double(answer);
else
Stop_Callback(hObject, eventdata, handles);
return;
end
%%
se=strel('disk',30);
Im=4095-Im;
background=imopen(Im,se);
I2=Im-background;
I3=imadjust(I2);
bw=imbinarize(I3,Threshold);
cc=bwconncomp(bw,4);
s= regionprops(cc,'Area');
area=cat(1,s.Area);
diameters=2*sqrt(area/3.1415);

Dmin=min(diameters);Dmax=max(diameters);
histogram(handles.axes2,diameters,30);set(handles.axes2,'xlim',[0 20],'ytick',[]);
title(handles.axes2,'Histogram of diameters');
h=imshow(bw*4095,[0 4095],'Parent',handles.axes1);alpha(h,0.20);
Hm=gray(256); Hm(256,:)= [1 0 0];
colormap(handles.axes1,Hm);
MnS=mean2(diameters);STDS=std2(diameters);
%% caixa de texto
textlabel=sprintf('Speckle Diam.:Avg=%2.2f, STD=%2.2f \nDiam. Min=%2.2f, Max=%2.2f
\nNumber Black Speckles=%5.f',[MnS,STDS,Dmin,Dmax,numel(diameters)]);
set(handles.text1,'String',textlabel);
Stopvid(vid,handles)
hold(handles.axes1,'off');
function Stopvid(vid,handles)
%% Indica apenas a atualização da informação
set(handles.axes1,'Nextplot','replace')
set(handles.axes2,'Nextplot','replace')
stop(vid);
% -----
function Speckle_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Speckle (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
function FValue=FocusLevel(Im2);
Hw=[1 1 -1 -1;1 1 -1 -1;-1 -1 1 1;-1 -1 1 1];
FValue=mean2(imfilter(Im2,Hw).^2);
function [Im,rect,h1,h2]=STARTVID(vid,handles);
start(vid);
cla(handles.axes1);cla(handles.axes2);
trigger(vid);Im=getdata(vid,1,'uint16');
h=imshow(Im,[0 4095],'Parent',handles.axes1);axis(handles.axes1,'off');
choice = questdlg('Would you like to crop the image?', ...
'Crop Menu','Yes','No','Use The Last Crop','Yes');
switch choice
case 'Yes'
[Im rect] = imcrop(Im);
save IMcrop.mat rect

```

```

case 'No'
sz=size(Im);
rect =[1 1 sz(2) sz(1)];
case 'Use The Last Crop'
load IMcrop.mat
Im = imcrop(Im,rect);
end
h1=imshow(Im,[0 4095],'Parent',handles.axes1);
[countH,x]=imhist(Im,4096);
h2=plot(handles.axes2,x,countH,'linewidth',1.5);
set(handles.axes2,'CLimMode','auto','NextPlot','replacechildren','xlim',[0
4095],'ytick',...
[],'xtick',[0 2048 4095]);title(handles.axes2,'Histogram');

function Nidata(src,event)
global VForce VPos
data=event.Data;
VForce=data(end,1);
VPos=data(end,2);
% -----
function Settings_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Settings (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% -----
function Rotation_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Rotation (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
function [DIm2,Im2]=SUBIMAGE(handles,DIm,Im);
[XL]=uint16(get(handles.axes1,'Xlim')-1);
[YL]=uint16(get(handles.axes1,'Ylim')-1);
[SY,SX]=size(Im);YL(2)=min(SY,YL(2));XL(2)=min(SX,XL(2));
DIm2=DIm(YL(1)+1:YL(2),XL(1)+1:XL(2));
Im2=Im(YL(1)+1:YL(2),XL(1)+1:XL(2));
function [count]=TEXTLABEL(handles,Im2,DIm2)
[count,~]=imhist(Im2,4096);
Mn=mean2(DIm2);
STD=std2(DIm2);
FValue=FocusLevel(Im2);
[Mx_1,I1]=max(count(1:128));
[Mx_2,I2]=max(count(129:256));
I2=I2+128;
[Min,~]=min(count(I1:I2));
I0=numel(find(Im2==0));I4095=numel(find(Im2==4095));[sy,sx]=size(Im2);
textlabel=sprintf('Image Size:%dx%d\nPixel value:(0)=%4.f,(4095)=%4.f\nNoise:
Avg=%3.1f,STD=%3.1f\nFocus Level=%3.1f\nMax:(1º)=%6.f,(2º)=%6.f\nGap Max.=%3.f\nMin=%
4.f',...% texto:"Noise:Avg=",numero:"%(_ _ _ .f),
[sx,sy, I0, I4095,Mn, STD, FValue,Mx_1,Mx_2,(I2-I1)*16,Min]);
set(handles.text1,'String',textlabel);
set(handles.text1,'String',textlabel);
function [count,MIG]=TEXTLABEL2(handles,Im2,~)
[sy,sx]=size(Im2);
[count,~]=imhist(Im2,4096);
Mn=mean2(Im2);
STD=std2(Im2);
I0=numel(find(Im2==0));I4095=numel(find(Im2==4095));
Entropia=entropy(Im2);
Im2=double(Im2);
[DX,DY] = gradient(Im2);

```

```

MIG=sqrt(DX.^2+DY.^2);

[sy,sx]=size(lm2);
lm2=lm2(1:end-rem(sy,3),1:end-rem(sx,3));
lm2=reshape(lm2,3,3,[]);
Ab=mean(mean(lm2,1),2);
Ab= repmat(Ab,3,3,1);
Subset=mean2(abs(lm2-Ab));
%% caixa de texto
textlabel=sprintf('Image Size:%dx%d\nPixel value:(0)=%4.f, (4095)=%4.f\nIntensity:
Avg=%3.1f , STD=%3.1f\nEntropy=%1.4f \nMean Subset Flutuacion=%3.3f\nMean Intensity
Gradient=%3.3f',...
[sx,sy,I0,I4095,Mn,STD,Entropia,Subset,mean2(MIG)]);
set(handles.text1,'String',textlabel);
% -----
function Contrast_Callback(hObject, eventdata, handles)
global vid d hline pos
if d==1;d=0;stop(vid);return;end;
[lm,rect,h1,h2]=STARTVID(vid,handles);
set(handles.axes2,'Nextplot','replace');
hline = imdistline(handles.axes1);
setColor(hline,[0 1 0]);
fcn = makeConstrainToRectFcn('imline',get(gca,'XLim'),get(gca,'YLim'));
setPositionConstraintFcn(hline,fcn);setLabelVisible(hline,false);
pos = getPosition(hline);pos=round(pos,0);
x1=pos(1,1);x2=pos(2,1);y1=pos(1,2);y2=pos(2,2);
plot(handles.axes2,(x1:x2)-x1+1,lm(y1,x1:x2),'r-','linewidth',1.4);
d=1;
while d==1
ref=lm;
trigger(vid);
lm=getdata(vid,1,'uint16');
lm=imcrop(lm,rect);
Dlm=abs(lm-ref);
[Dlm2,lm2]=SUBIMAGE(handles,Dlm,lm);
pos = getPosition(hline);
pos=round(pos,0);x1=pos(1,1);x2=pos(2,1);y1=pos(1,2);y2=pos(2,2);
lmdata=lm(y1,x1:x2);
lmdata=double(lmdata);
Npixels=numel(lmdata);
lmed=mean(lmdata);
l=(lmdata(1:fix(0.3*Npixels))-lmed);
l1=find(l<0,1,'first');l2=find(l<0,1,'last')+1;
P1=fix((l2+l1)/2);
l=(lmdata(fix(0.7*Npixels):Npixels)-lmed);
l3=find(l<0,1,'first')-1+fix(0.7*Npixels);l4=min(Npixels,find(l<0,1,'last')+fix(0.7
*Npixels));
P2=fix((l4+l3)/2);dP=P2-P1+1;
data=lmdata(P1:P2);
TEXTLABEL3(handles,lm2,Dlm2,data,dP);
%%
set(h1,'CData',lm);
plot(handles.axes2,(x1:x2)-x1+1,lmdata,'r-','linewidth',1.4);hold(handles
axes2,'on');
plot(handles.axes2,l1,lmdata(l1),'g*'); plot(handles.axes2,l2,lmdata(l2),'g*');
plot(handles.axes2,l3,lmdata(l3),'g*'); plot(handles.axes2,l4,lmdata(l4),'g*');
plot(handles.axes2,P1,lmdata(P1),'ko'); plot(handles.axes2,P2,lmdata(P2),'ko');
plot(handles.axes2,(x1:x2)-x1+1,lmed*ones(Npixels,1),'k','linewidth',1.4);hold
(handles.axes2,'off');

```

```

set(handles.axes2,'xlim',[1,x2-x1],'xtick',[1 x2-x1]);
end
Stopvid(vid,handles);
function TEXTLABEL3(handles,Im2,DIm2,data,dP)
[count,~]=imhist(Im2,4096);
Mn=mean2(DIm2);
STD=std2(DIm2);
FValue=FocusLevel(Im2);
[Mx_1,I1]=max(count(1:128));
[Mx_2,I2]=max(count(129:256));
I2=I2+128;
[Min,~]=min(count(I1:I2));
I0=numel(find(Im2==0));I4095=numel(find(Im2==4095));
%% Contraste
[MX,I1]=max(data);
[MN,I2]=min(data);
ImContrast=(MX-MN)/(MX+MN)*100;[sy,sx]=size(Im2);
textlabel=sprintf('Image Size:%dx%d\nPixel value:(0)=%4.f,(4095)=%4.f\nNoise:
Avg=%3.1f,STD=%3.1f\nFocus Level=%3.1f\nMax:(1°)=%6.f,(2°)=%6.f\nGap Max.=%3.f\nMin=%
4.f\nContrast:%3.2f,\nPixels:%3.1f',...% texto:"Noise:Avg=",número:"%(_ _ _ . _f),
[sx,sy, I0, I4095,Mn, STD, FValue,Mx_1,Mx_2,(I2-I1)*16,Min,ImContrast,dP]);
set(handles.text1,'String',textlabel);
set(handles.text1,'String',textlabel);
% -----
function SaveImage_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
warning off;
[filename, pathname,filterindex] = uiputfile({'*.tif'},'Save As');
if isequal(filename,0) | isequal(pathname,0)
else
set(gcf,'PaperPositionMode','auto')
switch filterindex
case 1
saveas(gcf,fullfile(pathname,filename),'tiff');
F = getframe(handles.axes1);
Image = frame2im(F);
imwrite(Image, fullfile(pathname, ['Axes1_' filename]),'tiff')
F = getframe(handles.axes2);
Image = frame2im(F);
imwrite(Image, fullfile(pathname, ['Axes2_' filename]),'tiff')
h1=get(handles.axes1, 'Children');
h2=get(handles.axes2, 'Children');
filename=[filename(1:end-4) '.mat'];
save(fullfile(pathname,filename),'h1','h2');
end
end
end

```

9.6 Anexo 6 - Programa de pré-processamento

Código *MatLab*[®] referente ao programa de pré-processamento desenvolvido.

```
function varargout = P1(varargin)
% P1 MATLAB code for P1.fig
% P1, by itself, creates a new P1 or raises the existing
% singleton*.
%
% H = P1 returns the handle to a new P1 or the handle to
% the existing singleton*.
%
% P1('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in P1.M with the given input arguments.
%
% P1('Property','Value',...) creates a new P1 or raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
% applied to the GUI before P1_OpeningFcn gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property application
% stop. All inputs are passed to P1_OpeningFcn via varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help P1
% Last Modified by GUIDE v2.5 19-Nov-2018 16:48:55
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn', @P1_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn', @P1_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn', [] , ...
'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
[varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before P1 is made visible.
function P1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
clc;
axis(handles.axes1,'off');
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes P1 wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = P1_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
% -----
function File_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
function Stop_Callback(hObject, eventdata, handles)
global d
d=0;
% -----
function Load_Callback(hObject, eventdata, handles)
[FileName,PathName,Index] = uigetfile('*.mat','Select image file','MultiSelect',
'on');
if isequal(FileName,0)
return
end
if ~iscell(FileName)
Nfiles=1;
else
Nfiles=size(FileName,2);
end
for i=1:Nfiles
if Nfiles>1
load(strcat(PathName, FileName{i}));
IM(:,i)=Im;
F_N(1,i)=Force_N;
D_mm(1,i)=Displacement_mm;
T_s(1,i)=Time_S;
else
load(strcat(PathName, FileName));
IM(:,i)=Im;
F_N(1,i)=Force_N;
D_mm(1,i)=Displacement_mm;
T_s(1,i)=Time_S;
end
end
axis(handles.axes1,'off');
Imag=imshow(IM(:,i),[],'Parent',handles.axes1);
s.h1=uicontrol('Style','slider',...
'Min',1,'Max',Nfiles,'Value',1,'units','normalized','Position',[0.1 0.04 0.5
0.05],...
'SliderStep',[1/Nfiles 1/Nfiles]);
set(s.h1,'Callback',{@SLIDE,handles,IM,T_s,F_N});
plot(handles.axes2,T_s,F_N,'linewidth',1.5);hold(handles.axes2,'on');
plot(handles.axes2,T_s(1),F_N(1),'r*');hold(handles.axes2,'off');
%%
I=uint16(IM(:,i));
[count,x]=imhist(I,4096)
plot(handles.axes3,x,count,'linewidth',1.5);
set(handles.axes3,'xlim',[0 4095],'ytick',[],'xtick',[0 4095]);title(handles.
axes3,'Histogram');
%%
textlabel=sprintf('Image Number:%3.f\nForce:%5.3f(N)\nTime:%5.3f(s)\n',...
1,F_N(1),T_s(1));
set(handles.text2,'String',textlabel);
% -----
function Save_As_Callback(hObject, eventdata, handles)
global IM
Formato=questdlg('Save file as:','Image Format','8 Bits','12 Bits','8 Bits');

```

```

if strcmp(Formato,'8 Bits')
prompt = {'Enter Min:','Enter Max:'};
title = 'Histogram Limits';
dims = [1 35];
definput = {'0','4095'};
answer = inputdlg(prompt,title,dims,definput);
Hlimits=str2double(answer);
filter = {'*.m'; '*.tif'; '*.mat'; '*.png'; '*.*'};
[filename, pathname, filter] = uiputfile(filter);
for i=1:size(IM,3)
Im8bits=uint8(((double(IM(:,i))-Hlimits(1))/(Hlimits(2)-Hlimits(1)))
*255);
imwrite(Im8bits,[num2str(i)],filename);
end
elseif strcmp(Formato,'12 Bits')
filter = {'*.m'; '*.slx'; '*.mat'; '*.*'};
[file, path] = uiputfile(filter);
end
% -----
function Close_Callback(hObject, eventdata, handles)
global d
selection = questdlg('Are you sure?','Close Program?','Yes','No','Yes');
if strcmp(selection,'No')
return;
elseif d==1
Stop_Callback(hObject, eventdata, handles);
return;
end
delete(handles.figure1);
function SLIDE(hObj,event,handles,IM,T_s,F_N)
global d val
val = fix(get(hObj,'Value'));
imshow(IM(:,val),[0 4095],'Parent',handles.axes1);
plot(handles.axes2,T_s,F_N,'linewidth',1.5);hold(handles.axes2,'on')
plot(handles.axes2,T_s(val),F_N(val),'r*');hold(handles.axes2,'off')
l=uint16(IM(:,val));
[count,x]=imhist(l,4096);
h2=plot(handles.axes3,x,count,'linewidth',1.5);
set(handles.axes3,'xlim',[0 4095],'ytick',[],'xtick',[0 4095]);title(handles.
axes3,'Histogram');
d=1;
while d
IMAG=imshow(IM(:,val),[0 4095],'Parent',handles.axes1);
[XL]=uint16(get(handles.axes1,'Xlim')-1)
[YL]=uint16(get(handles.axes1,'Ylim')-1)
Ima2=IMAG(YL(1)+1:YL(2),XL(1)+1:XL(2))
[count,x]=imhist(Ima2,4096);
set(h2,'Ydata',count);
end
textlabel=sprintf('Image Number:%3.f\nForce:%5.3f(N)\nTime:%5.3f(s)\n',...
val,F_N(val),T_s(val));
set(handles.text2,'String',textlabel);

```