



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

MARCELO RODRIGUES

**Desenvolvimento de algoritmo para cálculo de campos de deslocamento e
deformação por correlação digital de imagem**

Belém - PA
2022

MARCELO RODRIGUES

**Desenvolvimento de algoritmo para cálculo de campos de deslocamento e
deformação por correlação digital de imagem**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – PPGEMAT, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA, como requisito básico à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Engenharias

Orientador: Prof. Dr. Jean da Silva Rodrigues.

Belém - PA
2022

Dados para catalogação na fonte:
Setor de Processamento Técnico
Biblioteca IFPA - Campus Belém

R696d Rodrigues, Marcelo.

Desenvolvimento de algoritmo para cálculo de campos de deslocamento e deformação por correlação digital de imagens / Marcelo Rodrigues. – Belém, 2022.
100 f.

Orientador: Jean da Silva Rodrigues.

Dissertação (Mestrado: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais – PPGMAT) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA, 2022.

1. Imagem – correlação digital. 2. Algoritmo. 3. Materiais – deformações. 4. Materiais – deslocamento. I. Título.

CDD: 620.11063

Ficha catalográfica elaborada por Cristiane Vieira da Silva – Bibliotecária CRB-2 PA - 001327/0

MARCELO RODRIGUES

Desenvolvimento de algoritmo para cálculo de campos de deslocamento e deformação por correlação digital de imagem

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito básico para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA, tendo como área de concentração as Engenharias, sob a orientação do Prof. Dr. Jean da Silva Rodrigues.

Aprovado em: ____ / ____ / _____

Prof. Dr. Jean da Silva Rodrigues
(PPGEMAT/IFPA – Orientador)

Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa
(PPGEMAT/IFPA – Membro Interno)

Prof. Dr. Roberto Paulo Barbosa Ramos
(IFPA – Membro externo)

Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha
(PPGEP/UFPA – Membro Externo)

Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama
(PRODerna/UFPA – Membro Externo)

Belém - PA
2022

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todos aqueles que buscam transmitir conhecimento e contribuir com a disseminação de estudos e trabalhos científicos que possam otimizar o desenvolvimento intelectual das pessoas.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus, aos meus Pais Benedito Rosa Rodrigues e Maria Celeste Rodrigues (*in memoriam*) e à minha Filha Jade Louise Santiago Rodrigues, e um agradecimento especial ao Professor Dr. Jean da Silva Rodrigues pela sua enorme tolerância e dedicação na orientação deste trabalho.

RESUMO

A Correlação Digital de Imagem (*Digital Image Correlation* – DIC) é uma técnica que visa o cálculo de deslocamento e deformações de materiais diversos sem contato e se apresenta como uma alternativa às técnicas convencionais de extensometria. Este trabalho visa desenvolver um algoritmo para a determinação de deformações de corpos de prova através do método DIC em Matlab. Para este fim foram utilizados corpos de prova em alumínio, polímeros epóxi e poliéster e compósitos com lama vermelha e com fibras de juta e malva, sobre os quais foram aplicadas texturas na área útil para rastreamento dos pontos de interesse, sendo então submetidos a ensaios de tração, conforme as normas ABNT NBR 7549, ASTM D3039 e ASTM D638. Durante os ensaios foram utilizados extensômetro e *strain gauges* nas direções longitudinais e transversais, a fim de permitir a comparação dos resultados de deformação obtidos pelas técnicas convencionais de extensometria e aqueles obtidos através da DIC. Os resultados demonstraram que nos corpos de prova de alumínio, os campos de deslocamentos apresentaram, em campo amplo, valores coerentes, representando precisamente a região de fratura, apresentando valores subestimados e superestimados, respectivamente, em média, iguais a 8,43% e 4,35%. As amostras de compósitos apresentaram valores subestimados em média de 16,05% para a deformação longitudinal, tendo outro conjunto de amostras de compósitos valores de deformação longitudinal superestimados em 10,75%. Os resultados mostraram ainda que, a elevação da precisão das medidas das deformações por DIC depende fundamentalmente do aumento da resolução das imagens geradas ao longo do ensaio para melhor avaliação por meio dos algoritmos DIC produzidos.

Palavras Chaves: Correlação Digital de Imagem, Deslocamento, Deformações, Algoritmo

ABSTRACT

Digital Image Correlation (DIC) is a technique that aims to calculate displacement and deformations of different materials without contact and presents itself as an alternative to conventional strain gauge techniques. This work aims to develop an algorithm for the determination of deformations of specimens through the DIC method in Matlab, for this purpose specimens were used in aluminum, epoxy and polyester polymers and composites with red mud and with jute and mauve fibers, on which textures were applied in the useful area for tracking the points of interest, being then subjected to tensile tests, according to ABNT NBR 7549, ASTM D3039 and ASTM D638 standards. During the tests, strain gauges and strain gauges were used in the longitudinal and transverse directions, in order to allow the comparison of the deformation results obtained by conventional strain gauge techniques and those obtained through DIC. The results showed that in the aluminum specimens, the displacement fields presented very good results, represented in a wide field by the DIC, presenting underestimated and overestimated values, respectively, on average, equal to 8.43% and 4.35%. The composite samples showed values underestimated by an average of 16.05% for the longitudinal strain, and another set of composite samples showed values of overestimated longitudinal strain by 10.75%. The results also showed that the increase in the precision of the measurements of deformations by DIC depends fundamentally on the increase of the resolution of the images generated during the test for a better evaluation through the DIC algorithms produced.

Keywords: Digital image correlation, displacement, deformations, algorithm

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Haste BC, (b) Aplicação de carga, (c) Diagrama tensão-deformação	22
Figura 2 - Tensão no eixo x em material homogêneo e isotrópico	23
Figura 3 – Classificação das Técnicas Extensométricas	28
Figura 4 - Componentes principais de um sistema de processamento de imagens	29
Figura 5 - O processamento digital de imagem separado em aplicativo	30
Figura 6 - Uma imagem como uma função	31
Figura 7 - Coordenadas de uma imagem	31
Figura 8 - A mesma imagem com diferentes níveis de quantização: a) 16, b) 8, c) 4 e d) 3	37
Figura 9 - Uma cena de alto contraste, com: a) Uma pequena abertura e b) Uma grande abertura	39
Figura 10 - Gráfico com evolução de artigos relacionados ao título correlação digital de imagem	42
Figura 11 - Evolução do número de artigos envolvendo técnicas de medição de deformações	43
Figura 12 - Esquema do sistema de experimento 2D-DIC	44
Figura 13 - Deformação contínua de um subconjunto	46
Figura 14 - Resultado de correspondência para duas imagens de uma residência	48
Figura 15 - O problema de abertura na correspondência de imagem: a) Um ponto na linha, b) A abertura aumentada	49
Figura 16 - Problema de correspondência: a) Uma estrutura repetitiva, b) Uma deformação sem textura	50
Figura 17 - Padrão de texturas típicos	51
Figura 18 - Princípio do "deslocamento perfeito"	53
Figura 19 - Fluxograma dos Procedimentos Experimentais	57
Figura 20 - Corpo de prova de alumínio	59
Figura 21 - Padrão de textura dos corpos de prova de alumínio PB01 e PB02	59
Figura 22 – Preparação dos corpos de prova de Compósito Poliéster com Lama Vermelha para aplicação de textura	60
Figura 23 – Preparação da textura	61
Figura 24 - Instalação do Extensômetro	62

Figura 25 - Colagem de <i>Strain Gauge</i>	62
Figura 26 – Corpo de Prova com <i>Strain Gauge</i>	63
Figura 27 - Máquina de tração	64
Figura 28 - Filmagem dos corpos de prova	65
Figura 29 – Módulo de aquisição de dados com computador conectado.....	66
Figura 30 - Corpo de prova de alumínio (PB01).....	68
Figura 31 - Imagem do corpo de prova de alumínio (PB01) obtida pelo script I do Matlab	68
Figura 32 - Imagem do corpo de prova de alumínio (PB01) obtida pelo <i>script</i> I do Matlab em pixel	69
Figura 33 - Gráfico da deformação longitudinal gerado pelo <i>script</i> I do corpo de prova de alumínio (PB01).....	70
Figura 34 - Gráfico de deformação longitudinal gerado pelo <i>script</i> II, do Matlab, do corpo de prova de alumínio (PB01).....	70
Figura 35 - Corpos de prova de alumínio	72
Figura 36 - Imagens dos corpos de prova de alumínio obtidas pelo <i>script</i> I do Matlab	72
Figura 37 - Imagens obtidas dos corpos de prova de alumínio: a) PB02, b) PB03, c) PB04, d) PP05, e) PP06, f) PP07, g) PP08, obtidos pelo <i>script</i> I do Matlab em pixel	73
Figura 38 - Processamento de imagem dos corpos de prova de alumínio obtidas do <i>script</i> I do Matlab, no momento de ruptura.....	74
Figura 39 - Gráficos obtidos da deformação do corpo de prova de alumínio (PB02) através do: (a) <i>Script</i> I do Matlab, (b) <i>Script</i> II do Matlab	74
Figura 40 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pela Máquina de Tração, <i>Script</i> I e <i>Script</i> II do Matlab dos Corpos de Prova de Alumínio	76
Figura 41 - Corpos de prova de polímero epóxi	77
Figura 42 - Curva de deformação longitudinal dos corpos de prova de polímero epóxi: a) CP01EP, b) CP02EP	77
Figura 43 - Curva de Deformação Longitudinal do Corpo de Prova de Polímero Epóxi CPEP01, obtidos: a) Pelo <i>script</i> I do Matlab e b) Pelo <i>script</i> II do Matlab	78

Figura 44 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, <i>Script I</i> e <i>Script II</i> do Matlab dos Corpos de Prova de Polímero Epóxi	79
Figura 45 - Corpos de prova de compósito epóxi com tecido de juta.....	80
Figura 46 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova CP01LAS2, obtidos pelo: a) <i>Script I</i> do Matlab, b) <i>Script II</i> do Matlab.....	80
Figura 47 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, <i>Script I</i> e <i>Script II</i> do Matlab dos corpos de prova de compósito epóxi com tecido de juta.....	82
Figura 48 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de juta CP02J0, obtidos pelos: a) <i>script I</i> do Matlab e b) <i>script II</i> do Matlab.....	83
Figura 49 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, <i>Script I</i> e <i>Script II</i> do Matlab dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de juta	84
Figura 50 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de malva CP01M0, obtidas pelo: a) <i>script I</i> do Matlab, b) <i>script II</i> do Matlab.....	85
Figura 51 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, <i>Script I</i> e <i>Script II</i> do Matlab dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de malva	86
Figura 52 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova de polímero poliéster, obtidos pelo: a) <i>Script I</i> do Matlab, b) <i>Script II</i> do Matlab.....	87
Figura 53 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, <i>Script I</i> e <i>Script II</i> do Matlab dos corpos de prova de polímero poliéster.....	88
Figura 549 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova CP01LV de Compósito Poliéster com Lama Vermelha, obtidos pelo: a) <i>Script I</i> do Matlab, b) <i>Script II</i> do Matlab.....	89
Figura 55 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, <i>Script I</i> e <i>Script II</i> dos corpos de prova de compósito poliéster com lama vermelha.....	91
Figura 56 – Gráfico com a variação média dos valores de deformação longitudinal obtidos dos <i>Scripts I</i> e <i>II</i> das amostras em relação ao extensômetro	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Profundidades de bits de tipos de imagens comuns e domínios de aplicativos típicos	33
Tabela 2 - Dados comparativos da deformação longitudinal do corpo de prova de alumínio PB01 obtidos da máquina de tração e <i>scripts</i> I e II do Matlab	71
Tabela 3 – Valores da Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação e dados comparativos das deformações longitudinais (absolutas), dos corpos de prova de alumínio obtidos através dos dados da máquina de tração e <i>scripts</i> I e II do Matlab	75
Tabela 4 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparativo das deformações longitudinais dos corpos de prova de polímero epóxi obtidos pelo extensômetro e <i>scripts</i> I e II do Matlab.....	79
Tabela 5 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos dos valores de deformação longitudinal dos corpos de prova de compósito epóxi com tecido de juta	81
Tabela 6 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos dos valores de deformação longitudinal dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de juta	83
Tabela 7 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos dos valores de deformação longitudinal dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de malva	86
Tabela 8 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos de deformação longitudinal dos corpos de prova de polímero poliéster	88
Tabela 9 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos dos valores de deformação longitudinal dos corpos de prova de compósito poliéster com lama vermelha	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DIC	Digital Image Correlation
MATLAB	Matrix Laboratory
SI	Sistema Internacional
RGB	Red, Green, Blue
PIXEL	Picture Element
ROI	Region of Interest
JPEG	Joint Photographic Expert Group
TIF	Tagged Image File Format
GIF	Graphics Interchange Format
PNG	Portable Network Graphics
BMP	Bitmap
PBM	Portable Bitmap Format
ZOI	Zona de Interesse
PB01	Corpo de Prova de Alumínio, número 1
PB02	Corpo de Prova de Alumínio, número 2
PB03	Corpo de Prova de Alumínio, número 3
PB04	Corpo de Prova de Alumínio, número 4
PB05	Corpo de Prova de Alumínio, número 5
PB06	Corpo de Prova de Alumínio, número 6
PB07	Corpo de Prova de Alumínio, número 7
PB08	Corpo de Prova de Alumínio, número 8
CP01EP	Corpo de Prova de Polímero Epóxi, número 1
CP02EP	Corpo de Prova de Polímero Epóxi, número 2
CP03EP	Corpo de Prova de Polímero Epóxi, número 3
CP04EP	Corpo de Prova de Polímero Epóxi, número 4
CP05EP	Corpo de Prova de Polímero Epóxi, número 5
CP01LAS2 1, Série 2	Corpo de Prova de Compósito Epóxi com Tecido de Juta, número
CP02LAS2 2, Série 2	Corpo de Prova de Compósito Epóxi com Tecido de Juta, número
CP03LAS2 3, Série 2	Corpo de Prova de Compósito Epóxi com Tecido de Juta, número
CP04LAS2 4, Série 2	Corpo de Prova de Compósito Epóxi com Tecido de Juta, número
CP05LAS2 5, Série 2	Corpo de Prova de Compósito Epóxi com Tecido de Juta, número
CP06LAS2 6, Série 2	Corpo de Prova de Compósito Epóxi com Tecido de Juta, número
CP08LAS2 8, Série 2	Corpo de Prova de Compósito Epóxi com Tecido de Juta, número
CP02J0 de Juta, a zero grau	Corpo de Prova de Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional
CP04J0 de Juta, a zero grau	Corpo de prova de Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional
CP01M0 de Malva, número 1	Corpo de Prova de Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional

CP02M0	Corpo de Prova de Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional de Malva, número 2
CP05M0	Corpo de Prova de Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional de Malva, número 5
CP07M0	Corpo de Prova de Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional de Malva, número 7
CP08M0	Corpo de Prova de Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional de Malva, número 8
CP09M0	Corpo de Prova de Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional de Malva, número 9
CP01MP	Corpo de Prova de Polímero Poliéster, número 1
CP02MP	Corpo de Prova de Polímero Poliéster, número 2
CP03MP	Corpo de Prova de Polímero Poliéster, número 3
CP06MP	Corpo de Prova de Polímero Poliéster, número 6
CP08MP	Corpo de Prova de Polímero Poliéster, número 8
CP01LV	Corpo de Prova de Poléster com Lama Vermelha, número 1
CP02LV	Corpo de Prova de Poléster com Lama Vermelha, número 2
CP03LV	Corpo de Prova de Poléster com Lama Vermelha, número 3
CP04LV	Corpo de Prova de Poléster com Lama Vermelha, número 4
CP05LV	Corpo de Prova de Poléster com Lama Vermelha, número 5
CP06LV	Corpo de Prova de Poléster com Lama Vermelha, número 6
CP07LV	Corpo de Prova de Poléster com Lama Vermelha, número 7
CP08LV	Corpo de Prova de Poléster com Lama Vermelha, número 8

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão Normal
τ	Tensão de Cisalhamento
Pa	Pascal
N/m ²	Newton por metro quadrado
k	Quilo
M	Mega
G	Giga
ϵ	Deformação
E	Módulo de Elasticidade
E _{aço}	Módulo de Elasticidade do Aço
E _{borr}	Módulo de Elasticidade da Borracha Vulcanizada
ϵ_x	Deformação no Eixo x
σ_x	Tensão no eixo x
ν	Coefficiente de Poisson
ϵ_y	Deformação Lateral no eixo y
ϵ_z	Deformação Lateral no eixo z
P	Carga Aplicada
A ₀	Seção Transversal do Corpo de Prova
L ₀	Comprimento de referência original do corpo de prova
σ_{ip}	Limite de proporcionalidade
σ_e	Tensão de escoamento
σ_r	Limite de resistência
μ	Micra
k	Profundidade de bits de uma imagem
g	Valor cinza
γ	Valor gama
u	Deslocamento horizontal
v	Deslocamento vertical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	DESLOCAMENTO E DEFORMAÇÃO	21
3.1.1	Deslocamento	21
3.1.2	Deformação	21
3.2	COEFICIENTE DE POISSON	22
3.3	EXTENSOMETRIA	24
3.3.1	Conceito	24
3.3.2	Características	24
3.3.3	Tipos	26
3.3.4	Classificação das Técnicas Extensométricas	27
3.4	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM	29
3.4.1	Imagem Digital	30
3.4.2	Pixel	33
3.4.3	Resolução Espacial	34
3.4.3.1	Pontos por polegada (DPI)	34
3.4.3.2	Pixels por polegada (PPI)	34
3.4.4	Formatos de Arquivo de Imagem	34
3.4.5	Tipos de Dados de Imagem	36
3.4.6	Quantização	37
3.4.7	Tamanhos de Arquivo de Imagem	38
3.4.8	Percepção da Imagem	39
3.5	CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM	40
3.1.2	Histórico	40
3.5.2	Características	44
3.5.3	Correspondência de Imagens	47
3.5.3.1	O Problema da Abertura	48
3.5.3.2	O Problema da Correspondência	50

3.5.3.3	Padrão de Textura.....	51
3.5.4	Funções de subconjunto de formas	52
3.5.5	Zona de Interesse	53
3.6	MATERIAIS UTILIZADOS NOS CORPOS DE PROVA	54
3.6.1	Alumínio	54
3.6.2	Juta	55
3.6.3	Malva.....	55
3.6.4	Lama Vermelha.....	56
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	57
4.1	Etapas dos Procedimentos Experimentais.....	57
4.1.1	Desenvolvimento do Código Matlab.....	58
4.1.2	Preparação dos Corpos de Prova	58
4.1.3	Preparação da Textura.....	60
4.1.4	Colagem de Strain Gauge e Montagem de Extensômetro	61
4.1.5	Realização do Ensaio.....	63
4.1.7	Conversão de Imagem	65
4.1.8	Aplicação do Código DIC	65
4.1.9	Aquisição de Dados de Deformação.....	66
4.1.10	Tratamento de Dados.....	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5.1	Alumínio	67
5.2	Polímero Epóxi.....	77
5.3	Compósito Epóxi com Tecido de Juta	80
5.4	Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional de Juta	82
5.5	Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional de Malva	85
5.6	Polímero Poliéster.....	87
5.7	Compósito Poliéster com Lama Vermelha	89
5.8	Comparativo das Séries Testadas	92
6	CONCLUSÃO	93
	REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

Os métodos que utilizam técnicas ópticas para cálculo de deslocamento e deformação de materiais apresentaram incrementos consideráveis em sua aplicação nas últimas décadas. Dentre os vários métodos que utilizam técnicas ópticas, podemos citar: Interferometria, Moiré e Fotoelasticidade. Esses métodos são não destrutivos, cada um com suas características próprias e suas limitações, cujo custo relativamente elevado, tende a estimular a procura por métodos alternativos.

A evolução tecnológica das câmeras fotográficas e dos computadores, proporcionaram, respectivamente, imagens com resolução cada vez melhor e processamento de grandes quantidades de informação cada vez mais ágil, tornando a técnica de Correlação Digital de Imagem (DIC) uma boa alternativa, uma vez que os resultados obtidos através desta técnica são cada vez mais rápidos, precisos e confiáveis (BELEZA, 2017).

A técnica DIC também foi impulsionada pela introdução de algoritmos mais robustos e com o surgimento de câmeras de mais baixo custo. Essa técnica tem sido consistentemente investigada e utilizada na caracterização do comportamento de estruturas e materiais, pelas suas vantagens relativamente a outras técnicas experimentais. A aplicação desta técnica contempla medições dos campos de deslocamento e deformações no plano e no espaço à superfície e, mais recentemente, na medição no interior de corpos através de aplicação da técnica de correlação digital de imagem volumétrica (ROSAS, 2019).

A utilização do método DIC possibilita também a elaboração de mapas de deformação e pode ser usado com configuração de forma bidimensional (2D), neste caso é necessária apenas uma câmera, ou pode ainda ser utilizada configuração de forma tridimensional (3D), neste caso é necessário o uso de duas câmeras no mesmo campo de visão e um processamento mais complexo.

A Comunidade Científica tem proposto várias abordagens de sensoriamento remoto, dentre as quais merece destaque o método DIC, que pelas suas características, tem se tornado uma das ferramentas mais promissoras. Essa estratégia permite a obtenção de campo completo de deslocamentos e deformações através do uso de procedimentos de correspondência baseados em algoritmos de correlação e diferenciação numérica. Os dados são obtidos através da comparação entre várias imagens obtidas durante o teste mecânico (MAYO-CORROCHANO *et al.*, 2022).

A correlação digital de imagem (DIC) tornou-se ainda um padrão na indústria para recuperação de deslocamento e medição de tensão em testes de tração e caracterização de materiais (YANG *et al.*, 2022).

A técnica DIC apresenta também aplicação em estudos na área da biomecânica. Kelly *et al.* (2022) constataram que, as deformações medidas em hastes espinhais usando técnicas DIC concordam razoavelmente com as medições padrão realizadas através de *strain gauges*, e que as análises de tensão em tecidos moles e duros da coluna vertebral são viáveis durante os testes de flexibilidade padrão. Estes autores concluíram que o mapeamento de tensão através de técnicas ópticas de medição é viável, preciso e promissor para novos estudos biomecânicos da coluna vertebral.

O princípio básico da técnica DIC é mesclar as regiões de interesse na pré-deformação das imagens e tratar cada sub-região como um movimento rígido. Um determinado método de pesquisa é utilizado para cada região, a fim de realizar os cálculos de correlação de acordo com uma função predefinida para encontrar a região na imagem de pós-deformação onde o número de correlações é máximo, obtém-se então a deformação desta sub-região e seu respectivo deslocamento (ZHOU *et al.*, 2021).

Jähne (2005) afirma que os computadores não podem lidar com imagens contínuas, mas apenas com matrizes contendo números digitais. Portanto, é necessário representar imagens como matrizes bidimensionais de pontos. Neste contexto, torna-se vantajosa a utilização do *software Matrix Laboratory* (Matlab¹) para elaboração de algoritmo para aplicação da técnica DIC, esta linguagem de programação é particularmente interessante para manuseio e operação de matrizes.

A técnica DIC tem sido amplamente aplicada para testes de materiais onde o tamanho dos espécimes é pequeno e a configuração experimental é bem estabelecida. Nos últimos anos, o método DIC ganhou ainda mais popularidade em testes estruturais em larga escala devido à sua vantagem sobre as técnicas de medição pontuais, permitindo que uma grande área de estruturas seja medida eficientemente à distância (JANELIUKSTIS; CHEN, 2021).

Jovani *et al.* (2022) afirmam que ao contrário dos sistemas de medição clássicos, como sondas ou *strain gauges*, o método DIC fornece medições de campo completo e recupera deslocamentos em qualquer ponto da superfície observada.

¹ O Matlab foi desenvolvido pela empresa norte americana Mathworks, fundada em 1984, por Jack Little e Cleve Moler, este programa combina conceitos de matemática, engenharia e ciência da computação

Dentre as vantagens apresentadas pela técnica DIC, também merece destaque a viabilidade de sua utilização para cálculo de deslocamento e deformação em vários tipos de materiais, o que torna sua aplicação ainda mais ampla e versátil.

Barreto Junior (2008) descreve que a determinação dos campos de deslocamentos e deformações usando a técnica DIC, pode ser feita diretamente sobre uma estrutura em operação e independe do material do qual esta é constituída: metal, polímeros, materiais compósitos, entre outros.

O método DIC apresenta vantagens em relação aos extensômetros e *strain gauges*, uma vez que estes métodos fornecem uma única dimensão de deformação ou deslocamento, ao passo que através da técnica DIC é possível avaliar geometrias mais complexas por ser um método não destrutivo e sem contato. Uma variedade de medições pode ser fornecida a partir do método DIC, como deslocamentos e deformações no material, capturando vários dados, desde o teste de deformação até a falha. Métodos ópticos de análise de tensão tornaram-se um importante tópico de pesquisa após o desenvolvimento da interferometria (ANGEL *et al.*, 2022).

A Correlação Digital de Imagem está na vanguarda dos métodos experimentais utilizados para determinação de deslocamento e deformações de espécimes, é uma técnica de não contacto extremamente versátil, cuja aplicação estende-se a qualquer tipo de material, a DIC além de não causar danos ao material sob estudo, ainda permite que o experimento seja realizado *in loco*. Neste contexto, este trabalho visa o desenvolvimento de algoritmo, em Matlab, que demonstre a viabilidade e precisão da aplicação da técnica DIC em vários tipos de materiais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Elaborar algoritmo para determinação de campos de deslocamento e deformação através da Correlação Digital de Imagem (DIC), utilizando o Matlab.

2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver gráficos de deformação de campo amplo para avaliação das deformações ao longo dos corpos de prova;
- Calcular as deformações médias sofridas pelas amostras para comparar aos resultados obtidos pelas técnicas tradicionais de extensometria;
- Avaliar a precisão das medidas registradas em relação aos dados de deformação pela máquina de ensaio, extensômetro e *strain gauges*;
- Desenvolver algoritmo de fácil compreensão pelo usuário no que tange a inserção de dados e a leitura dos resultados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DESLOCAMENTO E DEFORMAÇÃO

Os conceitos de deslocamento e deformação estão associados, porém são conceitos distintos. Para diferenciar de forma clara e objetiva, estes conceitos serão demonstrados a seguir.

3.1.1 Deslocamento

Asaro e Lubarda (2006) afirmam que o deslocamento descreve a mudança na posição, em relação a um sistema de coordenadas conveniente, de todos os pontos do corpo. Deve-se supor que este campo seja de valor único e contínuo. A propriedade de valor único implica que não há buracos, lacunas ou interpenetrações de matéria no corpo.

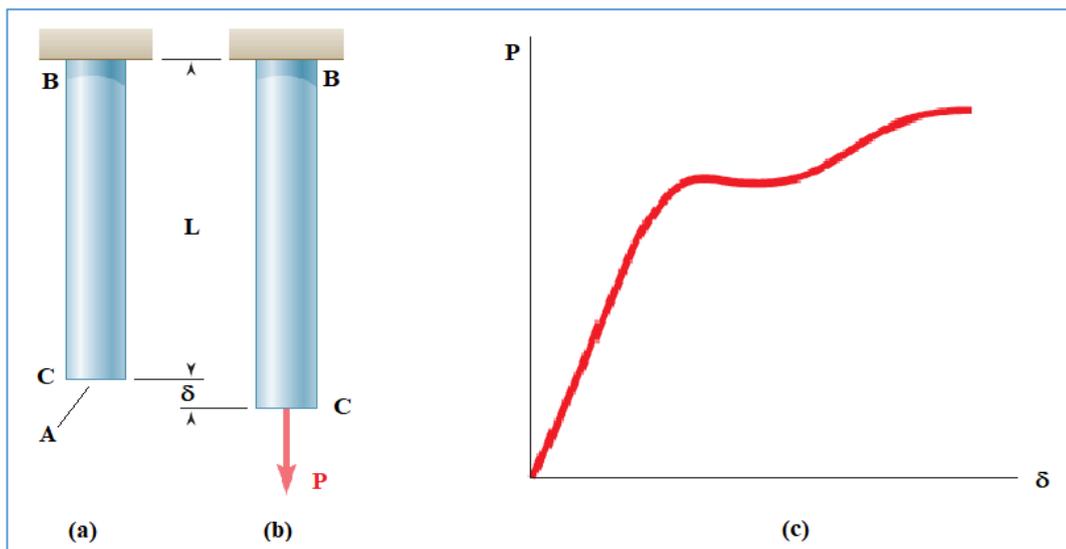
3.1.2 Deformação

A aplicação de uma força sobre um corpo tende a provocar mudança em sua forma e tamanho, esta mudança é denominada deformação, que pode ser humanamente visível ou praticamente imperceptível sem o uso de equipamentos específicos de medição, variações de temperatura também podem causar deformação nos corpos (HIBBELER, 2015).

Deformação pode ainda ser conceituada como o movimento relativo de pontos com relação a outros pontos de um mesmo corpo, é obviamente uma propriedade exclusiva dos corpos deformáveis reais.

A Figura 1a demonstra uma haste BC de comprimento L e área de seção transversal uniforme A , que é suspensa em B. Aplicando-se uma carga P à extremidade C, a haste se alonga (figura 1b). Traçando-se a magnitude P da carga contra a deformação δ (letra grega delta), obtém-se um diagrama tensão-deformação (Figura 1c). Embora este diagrama contenha informações úteis para a análise da haste considerada, não pode ser usado para prever a deformação de uma haste do mesmo material, mas com dimensões diferentes.

Figura 1 - (a) Haste BC, (b) Aplicação de carga, (c) Diagrama tensão-deformação



Fonte: Adaptado de Beer *et al.* (2020, p. 59)

A anisotropia do material tem grande influência na magnitude dos componentes normais de tensão. Para materiais aproximadamente isotrópicos, o aparecimento de componentes normais de tensão pode ser desprezado, enquanto para materiais consideravelmente anisotrópicos, tais componentes devem ser levados em consideração, uma vez que podem atingir magnitudes semelhantes às dos componentes de cisalhamento. No último caso, negligenciar os componentes normais pode ter um impacto significativo na determinação da tensão equivalente versus curva de deformação e, conseqüentemente, sobre a utilização dessas curvas para a identificação dos parâmetros do material (PEREIRA *et al.*, 2019).

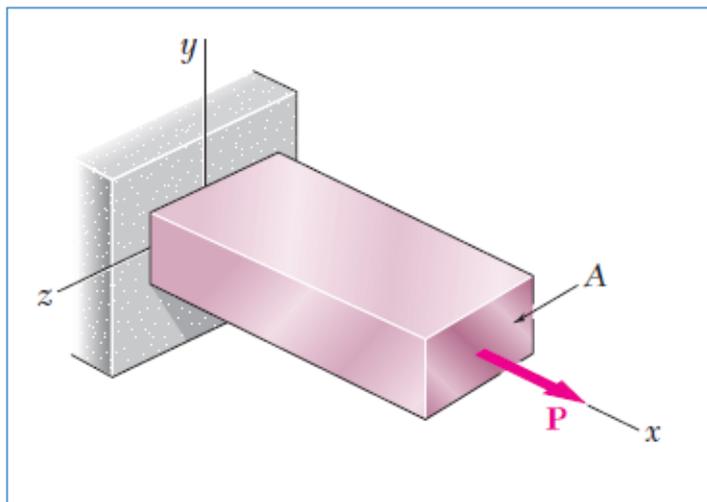
3.2 COEFICIENTE DE POISSON

Considerando-se uma barra delgada homogênea carregada axialmente, que seu limite de elasticidade não seja excedido e a aplicação da força P sobre uma área de seção A (Figura 2), temos então que $\sigma = P/A$, e pela lei de Hooke, conforme descrito pela Equação (1), temos:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (1)$$

Onde ϵ_x e σ_x são, respectivamente, a deformação e a tensão no eixo x , e E é a constante de elasticidade do material.

Figura 2 - Tensão no eixo x em material homogêneo e isotrópico



Fonte: Beer *et al.* (2020, p. 96)

Beer *et al.* (2020) afirmam que, em todos os materiais de engenharia, a deformação produzida por uma força axial de tração na direção da força é acompanhada por uma contração em qualquer direção transversal. Supondo-se que os materiais considerados são homogêneos e isotrópicos, ou seja, que suas propriedades mecânicas sejam consideradas independentes da direção e posição, conclui-se que a deformação específica deve ter o mesmo valor para qualquer direção transversal.

No século XIX, o cientista francês Siméon Denis Poisson (1781-1840) constatou que, na região elástica de um material que apresente as características citadas no parágrafo anterior, a relação entre as deformações específicas lateral e axial é uma constante, a qual é denominada coeficiente de Poisson, designada pela letra grega ν (nu). O coeficiente de Poisson é definido, matematicamente, pelas equações 2 e 3 abaixo.

$$\nu = - \frac{\text{deformação específica lateral}}{\text{deformação específica axial}} \quad (2)$$

OU

$$\nu = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = - \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \quad (3)$$

Onde ϵ_y e ϵ_z são as deformações laterais, respectivamente, nos eixos y e z, o sinal negativo das equações (2) e (3) se justificam pelo fato da deformação específica lateral provocar deformação específica axial e vice-versa.

Aplicando-se a equação (1) na equação (3), temos que:

$$\epsilon_y = \epsilon_z = - \frac{\nu \sigma_x}{E} \quad (4)$$

A equação (4) descreve a condição de deformação específica de uma barra, submetida a uma força axial aplicada na direção paralela ao eixo x.

É demonstrado teoricamente e confirmado experimentalmente que o coeficiente de Poisson medido ao longo dos eixos secundários de um material é sempre negativo. Além disso, as compressibilidades linear, de área e de volume podem ser todas negativas quando os parâmetros geométricos caem em algumas regiões bem definidas (YAO; NI; HE, 2021).

3.3 EXTENSOMETRIA

3.3.1 Conceito

Camargo e Cruz (2016) afirmam que a extensometria é uma técnica utilizada para a análise experimental de tensões e deformações em estruturas mecânicas e de alvenaria. Estas estruturas apresentam deformações sob aplicação de carregamento ou sob efeito da variação de temperatura.

3.3.2 Características

Segundo Affonso (2011), há vários tipos de extensômetros, com princípios de funcionamento distintos, cada um apresenta suas características inerentes e apesar de suas variedades e reconhecidas vantagens, nenhum pode ser considerado perfeito.

Os sistemas extensométricos devem apresentar quatro características básicas, quais sejam: comprimento-base, intervalo de deformação, sensibilidade de medição, e exatidão na leitura.

Os erros introduzidos poderão depender tanto do comprimento-base, quanto da largura do extensômetro. Destarte, o comprimento da base de medição é uma das características mais importantes no momento da escolha do extensômetro.

A segunda característica, também denominada de tamanho da faixa de medição, é definida como a máxima deformação a ser gravada sem reiniciar ou mesmo reposicionar o aparelho.

A terceira característica, que é a sensibilidade, está relacionada ao menor valor de deformação que pode ser lido pela escala associada ao extensômetro. É importante salientar que sensibilidade e exatidão são termos distintos. Pois, a sensibilidade do extensômetro pode ser aumentada, porém, alguns fatores, tais como: ruídos, atrito, etc, podem causar grandes erros e afetar sua exatidão.

O intervalo de deformação e a sensibilidade estão intimamente relacionados, pois deve-se considerar que os extensômetros muito sensíveis respondem a pequenas deformações. É comum a realização do balanceamento entre a escala de medição e a sensibilidade, cuja finalidade é a obtenção de um bom desempenho em ambas características.

Com relação à exatidão, podemos afirmar que, caso os extensômetros não sejam utilizados com o máximo cuidado, os instrumentos muito sensíveis tendem a apresentar erros. A perda do movimento em decorrência de folga ou desgaste podem causar imprecisões em extensômetros mecânicos.

Existem aplicações, cujos procedimentos adequados dos extensômetros, apresentam sensibilidade inferior a $1\mu^2$. Neste contexto, é importante salientar que quando o item sensibilidade não for primordial, as faixas entre 50 a 100μ são suficientes. Neste caso, os sistemas de extensometria apresentam menos complexidade.

² Micron é uma unidade de medida representada pela letra grega μ (mi), 1μ corresponde a 10^{-6} m

3.3.3 Tipos

Dally e Shukla (2010) afirmam que os princípios mais importantes empregados na construção de extensômetros podem ser usados como base para sua classificação. Os sistemas de extensometria são classificados em quatro grandes grupos básicos, conforme demonstrados a seguir.

a) Mecânicos

A medição é realizada através de dispositivos mecânicos, alavancas e engrenagens conectados à base de leitura. São utilizados em ensaios de tração, normalmente, onde se deseja conhecer o diagrama tensão-deformação ou propriedades mecânicas do material ensaiado. O alongamento ou encurtamento do corpo de prova provoca movimentos nos braços do medidor.

b) Ópticos

As técnicas de medição óptica apresentam significativas vantagens em relação a métodos homólogos convencionais para aplicações de processamento de imagens e medição. Suas principais vantagens são: análise remota, medição sem contacto, visualização de todo o campo e não há necessidade de preparação especial da amostra. As técnicas de extensometria óptica ainda apresentam características inerentemente não destrutivas e são imunes a interferências electromagnéticas.

Considerando-se que nos sistemas ópticos, a luz é utilizada como elemento sensor, o sistema de medição é capaz de elevada sensibilidade, elevada resolução e de calibração absoluta.

A maioria das técnicas ópticas sem contacto requerem que um alvo contrastante seja anexado ao corpo de prova para definir o comprimento axial padrão. Esta é uma condição crítica, pois qualquer deslizamento ou distorção do alvo pode gerar um sinal de tensão espúrio (MCENTEGGART, 2008).

c) Elétricos

São os mais empregados em análise experimental, são muitas vezes denominados *strain gauge*, seu princípio de funcionamento se baseia na variação da resistência elétrica de condutores quando submetidos a esforços mecânicos.

Os extensômetros elétricos funcionam utilizando um transdutor³ capaz de medir deformações de corpos. Quando um material é deformado, sua resistência elétrica é alterada, a fração de mudança na resistência é proporcional à fração de mudança no comprimento do material.

Os strain gauges representam uma tecnologia sensível, precisa, de baixo custo, amplamente utilizada e altamente testada, embora possam ser fisicamente frágeis e inconsistentes. Os strain gauges são compostos por um fio de liga metálica disposto em um padrão semelhante a uma grade, cuja resistência elétrica muda devido à tensão mecânica (ZDERO; SHAH; GOSHULAK, 2017).

d) Acústicos

A medição é feita por auscultação do período de vibração de um fio de aço tendido entre dois pontos ligados à base de medida.

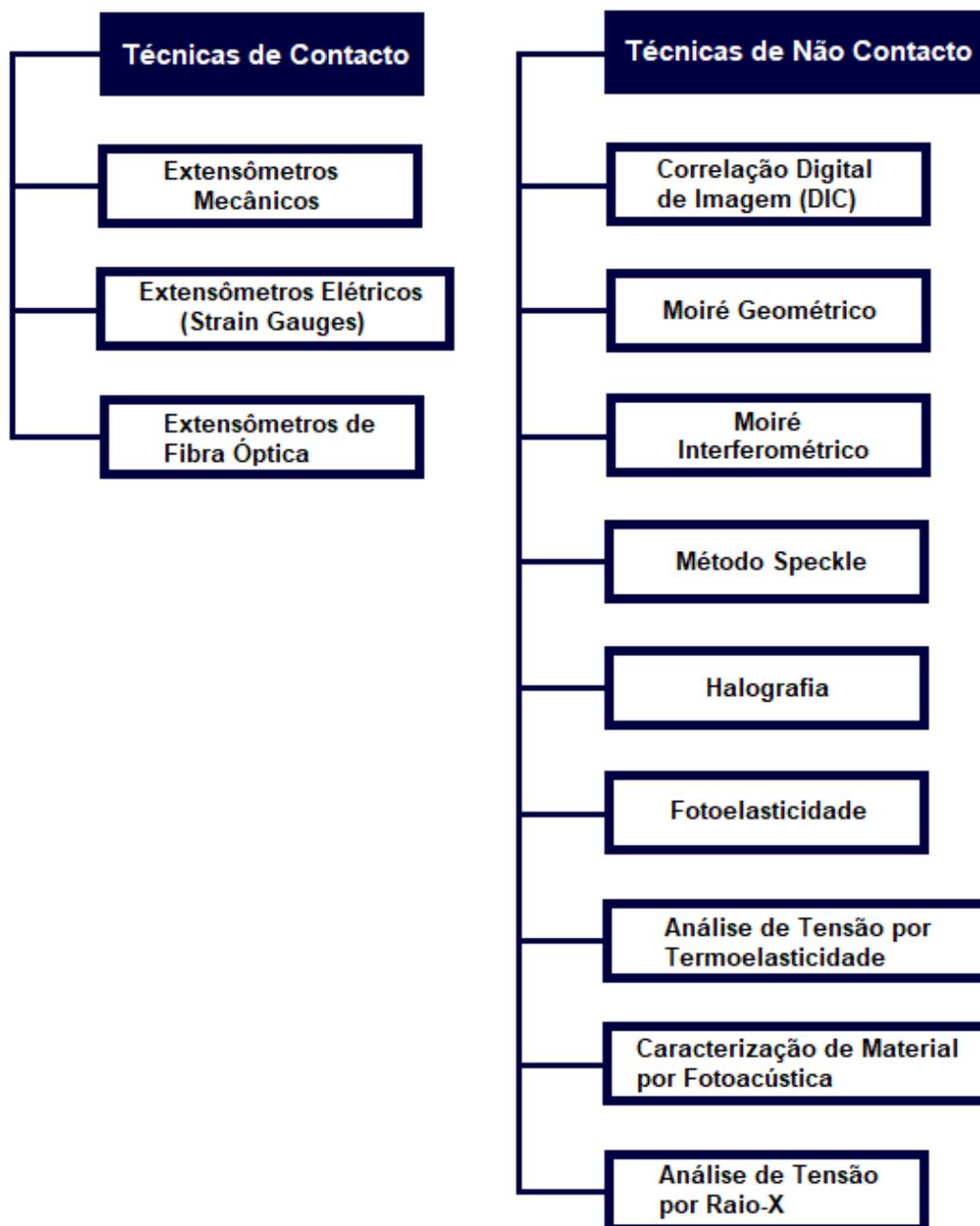
A emissão acústica é uma tecnologia em desenvolvimento que se apresenta como uma técnica de ensaio não destrutivo para monitoramento de falhas e verificação de crescimento de trincas em vários equipamentos, tais como: vasos de pressão, sistema de dutos, reatores, etc.

3.3.4 Classificação das Técnicas Extensométricas

Sharpe (2008) classifica as técnicas extensométricas em: técnicas de contacto e técnicas de não contacto. Esta classificação está relacionada ao contacto físico entre o instrumento de medição e o corpo de prova. A figura 3 demonstra, de forma sintética, estas duas grandes famílias.

³ O transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro.

Figura 3 – Classificação das Técnicas Extensométricas



Fonte: Adaptado de Affonso (2011, p. 56)

Os extensômetros de contacto estão em contacto mecânico direto com a amostra, o contacto, geralmente, não é afetado por mudanças na condição de superfície do espécime, por exemplo aquele que pode ser causado pela oxidação. No entanto, particularmente, com materiais delicados, tensões de contacto podem levar à falha prematura da amostra e o peso de um extensômetro de contacto pode gerar alguns graus de curvatura na amostra.

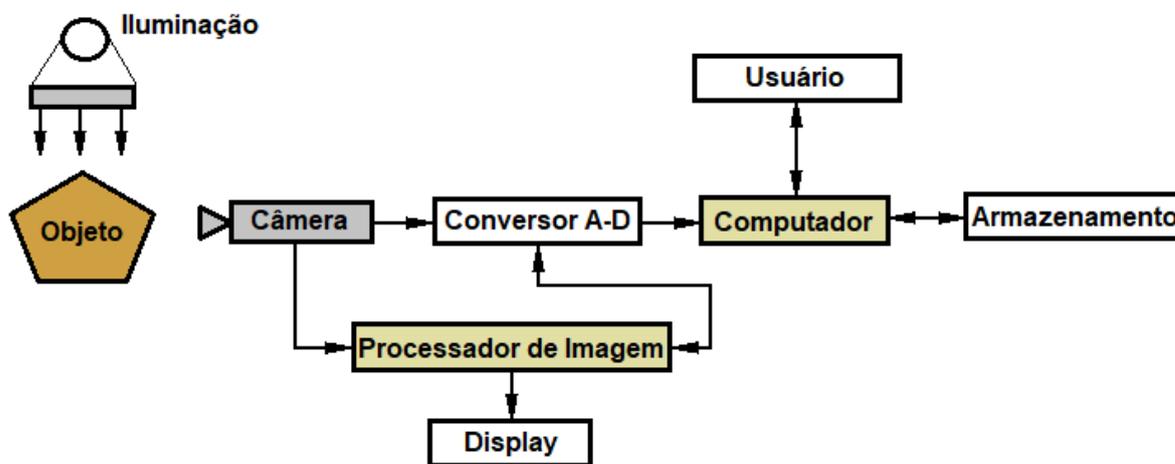
A extensometria sem contacto (óptica) possui várias abordagens com diferentes aplicações. A maioria dos extensômetros ópticos, são projetados para uso em temperatura ambiente e operam em um modo de reflexão onde a luz é refletida fora dos alvos ópticos de volta para o detector. Extensômetros sem contacto são inerentemente livres de ressonâncias mecânicas espúrias e histerese, no entanto, pode haver um atraso de tempo na saída do sinal que pode afetar a estabilidade ao usar o sinal para controle de malha fechada (SHARPE, 2008).

Há conceitos importantes relacionados às técnicas de extensometria sem contacto (óptica), conforme serão demonstrados a seguir.

3.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

A tarefa elementar do processamento digital de imagem é registrar, otimizar e converter as imagens em novas estruturas de dados com o objetivo de obter uma base melhor para sua análise.

Figura 4 - Componentes principais de um sistema de processamento de imagens



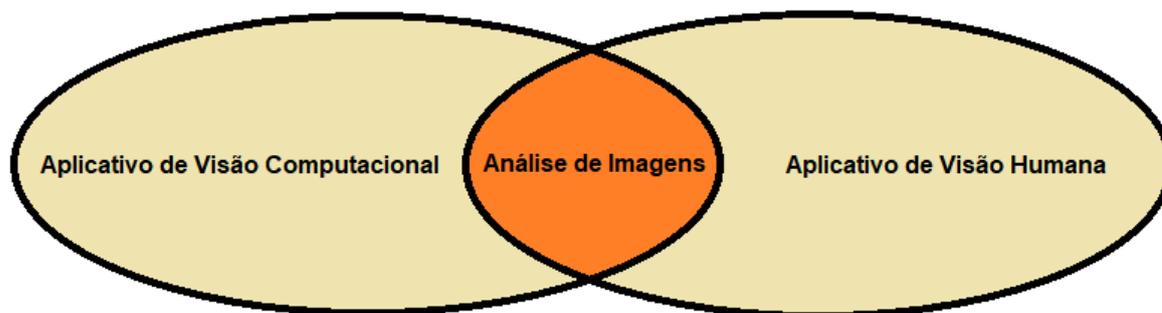
Fonte: Adaptado de Sharpe (2008, p. 483)

Sharpe (2008) descreve o cenário típico de um sistema de processamento digital de imagem (figura 4), onde um objeto recebe iluminação, sua imagem é registrada por uma câmera, após a conversão digital dos sinais analógicos da imagem registrada pela câmera, ocorre seu armazenamento no computador.

A representação digital constitui o ponto de partida para as etapas subsequentes de processamento algorítmico, análises, e conclusões, também conhecidas como processamento de imagem e visão computacional.

Conforme demonstrado na figura 5, considera-se que o processamento de imagem digital possui duas grandes áreas de aplicação principais: (1) Aplicativos de visão computacional e (2) Aplicativos de visão humana, com a análise de imagem sendo um componente chave no desenvolvimento e implantação de ambos.

Figura 5 - O processamento digital de imagem separado em aplicativo



Fonte: Adaptado de Umbaugh (2018, p. 04)

O sistema de visão humana é limitado a comprimentos de onda de luz visíveis, que cobrem apenas uma pequena parte do espectro eletromagnético. O computador é capaz de lidar com quase todo o espectro eletromagnético, desde raios gama a ondas de rádio, e pode processar outras modalidades de imagem, como ultrassom e ressonância magnética (UMBAUGH, 2018).

3.4.1 Imagem Digital

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$. Onde x e y são coordenadas espaciais e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x, y) é chamado de intensidade ou nível de cinza da imagem naquele ponto. Quando x, y e os valores de amplitude de f são todos finitos, quantidades discretas, chamamos a imagem de imagem digital (EDDINS *et al.*, 2009).

McAndrew (2015) afirma que uma imagem digital difere de uma foto porque os valores x, y e $f(x, y)$ são todos discretos. Normalmente eles assumem apenas valores inteiros, a imagem mostrada na figura 6 descreve x e y variando de 1 a 256 cada, e os valores de brilho também variam de 0 (preto) a 255 (branco).

Figura 6 - Uma imagem como uma função

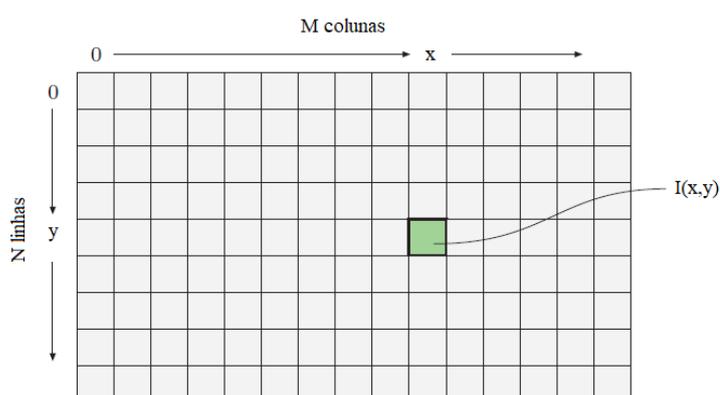


Fonte: Adaptado de McAndrew (2015, p. 21)

Uma imagem digital pode ser considerada uma grande variedade de pontos amostrados da imagem contínua, cada um dos quais tem um brilho quantizado particular, esses pontos são os pixels, que constituem a imagem digital.

Burge e Burger (2009) afirmam que para saber qual posição corresponde ao elemento da imagem, é necessário estabelecer um sistema de coordenadas, conforme pode ser observado na figura 7.

Figura 7 - Coordenadas de uma imagem



Fonte: Adaptado de Burge e Burger (2009, p. 10)

Ao contrário das convenções normais da matemática, no processamento de imagem, o sistema de coordenadas é geralmente invertido na direção vertical, ou seja, a coordenada y vai de cima para baixo e a origem está no canto superior esquerdo. Embora este sistema não tenha vantagem prática ou teórica, e, de fato, pode ser um pouco confuso, no contexto de transformações geométricas, é usado quase sem exceção em sistemas de *software* de imagem.

Eddins *et al.* (2009) afirmam ainda que as imagens coloridas são formadas por uma combinação de imagens individuais. Por exemplo, no sistema de cores RGB uma imagem colorida consiste em três imagens monocromáticas individuais, conhecidas como imagens ou componentes primários: *Red* (vermelho), *Green* (verde) e *Blue* (azul).

A analogia com os conhecidos vetores bidimensional e tridimensional, nos espaços R_2 e R_3 nos ajuda a entender como outras representações para imagens podem ser obtidas. Uma imagem com dimensões $M \times N$ representa um ponto no espaço vetorial $M \times N$. Se mudarmos o sistema de coordenadas, a imagem permanece a mesma, mas suas coordenadas mudam. Isso significa que apenas observamos a mesma informação de um ponto de vista diferente.

Pode-se concluir primeiramente que todas as representações são equivalentes entre si, sendo que cada uma fornece uma representação completa da imagem. Em segundo lugar, transformações de coordenadas adequadas conduzem de uma representação a outra e vice-versa (JÄHNE, 2005).

Uma imagem digital é um sinal 2D em essência, e é a versão digital da manifestação 2D da cena 3D no mundo real. Apesar dos termos figura e imagem serem considerados sinônimos, podemos afirmar que figura é a versão analógica de imagem. Podemos considerar que uma imagem contém subimagens, denominadas de região de interesse (ROI⁴). As amplitudes de uma determinada imagem são geralmente números reais ou inteiros, que são o resultado de um processo de quantização que converte uma faixa contínua (entre 0 e 100%) para um número discreto de níveis (CHEN; QIDWAY, 2009).

Breckon e Solomon (2011) afirmam que muitas vezes é teoricamente conveniente tratar uma imagem como um sinal espacial contínuo. Em particular, este fato, às vezes, nos permite fazer um uso mais natural das técnicas poderosas de integral e cálculo diferencial para compreensão das propriedades, manipulação e processamento de imagens. A análise matemática de imagens discretas geralmente leva a uma análise da formulação algébrica linear que torna-se melhor em alguns casos.

⁴ ROI é a abreviatura dos termos em inglês "Region of Interest" que significam região de interesse

3.4.2 Pixel

Os termos Pixel ou Pel representam a abreviatura dos termos “Picture Element” que em português significam Elemento de Imagem, pode ser definido como o menor elemento endereçável em uma imagem digital. Os pixels de uma imagem colorida têm valores de cinza, vermelho, verde e azul (SINECEN, 2016).

Os computadores não lidam com imagens contínuas, mas com matrizes contendo números digitais. Portanto, é necessário representar imagens como matrizes bidimensionais (JÄHNE, 2005).

Burge e Burger (2009) afirmam que as informações em um elemento de imagem dependem do tipo de dado a ser usado para representá-lo. Valores de pixel são praticamente sempre palavras binárias de comprimento k , um pixel pode representar qualquer um dos 2^k diferentes valores. O valor k é chamado de profundidade de bits da imagem.

A tabela 1 demonstra a faixa de *bits* de uma imagem de acordo com sua aplicação. Uma imagem típica em tons de cinza usa $k = 8$ bits, que equivale a 1 *byte* por pixel, e valores de intensidade na faixa de $[0 \dots 255]$, onde o valor 0 representa o brilho mínimo (preto) e 255 o máximo brilho (branco).

Tabela 1 - Profundidades de bits de tipos de imagens comuns e domínios de aplicativos típicos

Escala de cinza (imagens de intensidade):			
Canal	Bits/Pixels	Faixa	Aplicação
1	1	0...1	Imagem Binária: documento, ilustração, fax
1	8	0...255	Universal: foto, scaneamento, impressão
1	12	0...4095	Alta qualidade: foto, scaneamento, impressão
1	14	0...16383	Profissional: foto, scaneamento, impressão
1	16	0...65535	Altíssima qualidade: medicina, astronomia
Imagem Colorida:			
Canal	Bits/Pixels	Faixa	Aplicação
3	24	$[0 \dots 255]^3$	RGB, universal: foto, scaneamento, impressão
3	36	$[0 \dots 4095]^3$	RGB, alta qualidade: foto, scaneamento, impressão
3	42	$[0 \dots 16383]^3$	RGB, profissional: foto, scaneamento, impressão
4	32	$[0 \dots 255]^4$	CMYK: pré-impressão digital
Imagens Especiais:			
Canal	Bits/Pixels	Faixa	Aplicação
1	16	-32768...32767	Valores inteiros positivos/negativos
1	32	(+/-) 3,4.1038	Valores de pontos flutuantes: medicina, astronomia
1	64	(+/-) 1,8.10308	Valores de pontos flutuantes: processamento interno

Fonte: Adaptado de Burg e Burger (2009, p. 11)

3.4.3 Resolução Espacial

Sinecen (2016) descreve que a resolução espacial pode ser definida como o número de pixels por polegada e possui diferentes métodos de medição para dispositivos diferentes.

3.4.3.1 Pontos por polegada (DPI)

DPI geralmente é usado em monitores. Às vezes, é chamado de PPI (pixels por polegada). Mas as duas expressões apresentam uma diferença. DPI também é usado para medir a resolução espacial de impressoras, isto significa que DPI define quantos pontos de tinta por polegada são utilizados na imagem impressa.

3.4.3.2 Pixels por polegada (PPI)

PPI é geralmente usado em *tablets*, telefones celulares, etc. Se a e b são resoluções de altura e largura da imagem, podemos calcular o valor PPI de qualquer dispositivo usando a Equação 8.

$$\text{PPI} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\text{Comprimento da Diagonal do Dispositivo}} \quad (8)$$

Breckon e Solomon (2011) afirmam que é importante reconhecer que a resolução de bits de uma imagem não necessariamente corresponde à resolução do sistema da imagem de origem. Uma característica comum de muitas câmeras é o ganho automático, em que as respostas mínimas e máximas sobre a imagem são detectadas e este intervalo é automaticamente dividido em um número conveniente de bits.

3.4.4 Formatos de Arquivo de Imagem

Os formatos de arquivo de imagem são importantes para impressão, digitalização, etc. Os formatos mais comuns são: JPEG, TIF, PNG, GIF, BMP e PBM.

a) JPEG

É a sigla dos termos em inglês “Joint Photographic Expert Group”, é também denominado JPG, é o padrão mais comum para compactar imagens digitais. É muito utilizado em páginas da *web*, documentos, *e-mail*, etc, pois as imagens digitais têm tamanho menor do que outros formatos de arquivo. Entretanto, as imagens JPEG têm resolução muito baixa.

b) TIF

É a sigla dos termos em inglês “Tagged Image File Format”, TIFF ou TIF tem a melhor resolução para obras comerciais, apresentam alta qualidade, porém são arquivos com tamanho muito grande.

c) GIF

É a sigla dos termos em inglês “Graphics Interchange Format”, GIF era utilizado para vídeos de 8 bits para conexão à *internet* com modem *dial-up*.

d) PNG

É a sigla dos termos em inglês “Portable Network Graphics”. O formato de arquivo PNG tem tamanho menor do que TIF e mais resolução do que GIF e JPG. Atualmente, é usado nas páginas da *web* por ter propriedade de transparência.

e) BMP

É a abreviatura do termo em inglês “Bitmap”. O formato BMP é simples e amplamente utilizado no *Windows*, formato de arquivo compatível com imagens em tons de cinza, indexadas e em cores reais. O BMP suporta imagens binárias, mas não de maneira eficiente, uma vez que cada pixel é armazenado usando um *byte* inteiro.

f) PBM

É a sigla dos termos em inglês “Portable Bitmap Format”. A família PBM consiste em uma série de formatos de arquivo muito simples que são excepcionais no sentido de que podem ser opcionalmente salvos em um texto de formato legível que pode ser facilmente lido em um programa ou simplesmente editado usando um editor de texto.

3.4.5 Tipos de Dados de Imagem

Breckon e Solomon (2011) descrevem que a escolha do formato de imagem a ser usado pode ser determinada não apenas pelo seu conteúdo, mas também pelos tipos de dados da imagem real que são necessários para seu armazenamento. Além da resolução de uma determinada imagem, vários tipos de imagens distintas também existem, conforme será descrito a seguir.

a) Imagens binárias: São matrizes 2D que atribuem um valor numérico do conjunto para cada pixel na imagem. Às vezes, são chamadas de imagens lógicas: o preto corresponde a zero e o branco corresponde a um. Como nenhum outro valor é permitido, essas imagens podem ser representadas como um fluxo de *bits* simples, mas na prática eles são representados como imagens inteiras de 8 bits no formato de imagem comum.

b) Imagens de intensidade ou escala de cinza: São matrizes 2D que atribuem um valor numérico a cada pixel que é representativo da intensidade neste ponto. O intervalo de valores de pixel é limitado pela resolução de *bits* da imagem e tais imagens são armazenadas como imagens inteiras de N *bits* com um determinado formato

c) Imagens RGB ou true-color: São matrizes 3D que atribuem três valores numéricos a cada pixel, cada valor corresponde ao canal componente de imagem: vermelha, verde e azul (RGB), respectivamente.

d) Imagens de ponto flutuante: Por definição, não armazenam valores inteiros de cores. Em vez disso, armazenam um número de ponto flutuante que, dentro de um determinado intervalo definido pela precisão de ponto flutuante da resolução de *bits* da imagem, representa a intensidade.

3.4.6 Quantização

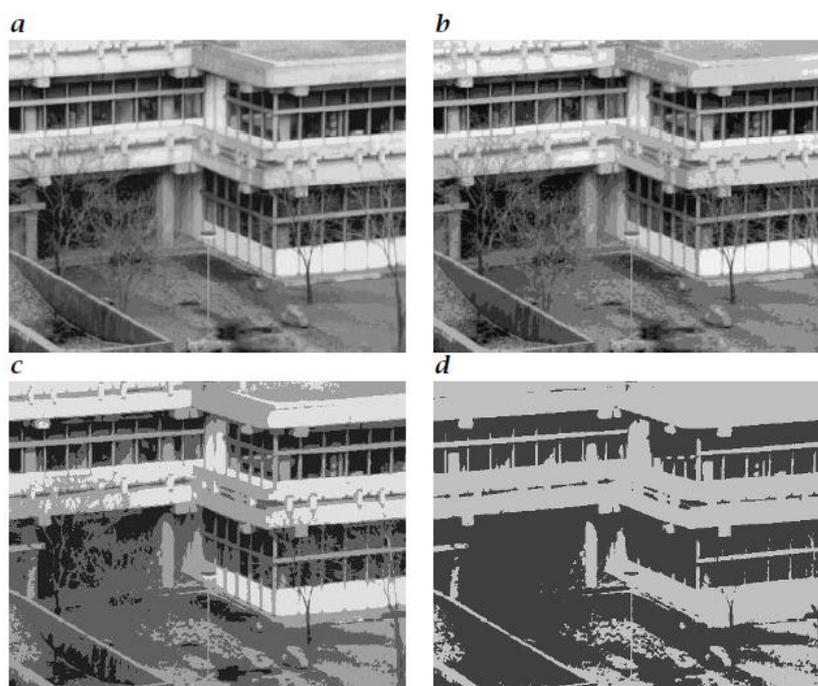
Jähne (2005) afirma que para uso com um computador, a irradiância medida no plano da imagem deve ser mapeado em um número limitado de valores discretos de cinza. Esse processo é chamado de quantização. O número de quantização necessária de níveis de processamento de imagem pode ser discutido com respeito a dois critérios:

Em primeiro lugar, podemos argumentar que nenhuma etapa de valor cinza deve ser reconhecida por nosso sistema visual, assim como não vemos os pixels individuais nas imagens digitais.

O outro critério está relacionado à tarefa de imagem, para um aplicativo simples em visão de máquina, onde objetos iluminados homogeneamente devem ser detectados e medidos, apenas dois níveis de quantização, por exemplo, uma imagem binária, pode ser suficiente. Outras aplicações, como espectroscopia de imagem ou diagnóstico médico com imagens de raio-x requerem a resolução de leves mudanças na intensidade.

Kilic e Kayacan (2007) afirmam que uma das principais técnicas de processamento de imagens é a quantização, esta técnica envolve representação de dados por um número finito de níveis com base em alguns critérios, como a minimização da distorção do quantizador.

Figura 8 - A mesma imagem com diferentes níveis de quantização: a)16, b) 8, c) 4 e d) 3



A figura 8 mostra imagens quantizadas com 2 a 16 níveis de valores de cinza. Pode ser visto claramente que um baixo número de valores de cinza leva a bordas falsas e torna muito difícil reconhecer objetos que mostram variação espacial lenta em valores de cinza. Geralmente, os dados da imagem são quantizados em 256 valores de cinza. Então cada pixel ocupa 8 bits ou um *byte*.

Um baixo nível de quantização faz com que os recursos com baixo contraste desapareçam parcial ou totalmente. Em imagens impressas, 16 níveis de valores de cinza parecem ser suficientes, mas em um monitor ainda seríamos capazes de ver as etapas dos valores de cinza.

3.4.7 Tamanhos de Arquivo de Imagem

McAndrew (2015) afirma que os arquivos de imagem tendem a ser grandes e que a quantidade de informações usadas em diferentes tipos de imagens de tamanhos variados devem ser investigadas. Considerando-se uma imagem binária de 512×512 , o número de bits usados nesta imagem é:

$$\begin{aligned} 512 \times 512 \times 1 &= 262.144 \\ &= 32.768 \text{ bytes} \\ &= 32,678 \text{ kb} \\ &\approx 0,033 \text{ Mb} \end{aligned}$$

Uma imagem em tons de cinza do mesmo tamanho requer:

$$\begin{aligned} 512 \times 512 \times 1 &= 262.144 \text{ bytes} \\ &= 262,144 \text{ kb} \\ &\approx 0,262 \text{ Mb} \end{aligned}$$

Se agora voltarmos nossa atenção para as imagens coloridas, cada pixel está associado a 3 bytes de informações coloridas. Uma Imagem 512×512 , portanto, requer:

$$\begin{aligned} 512 \times 512 \times 3 &= 786.432 \text{ bytes} \\ &= 786,43 \text{ kb} \\ &\approx 0,786 \text{ Mb} \end{aligned}$$

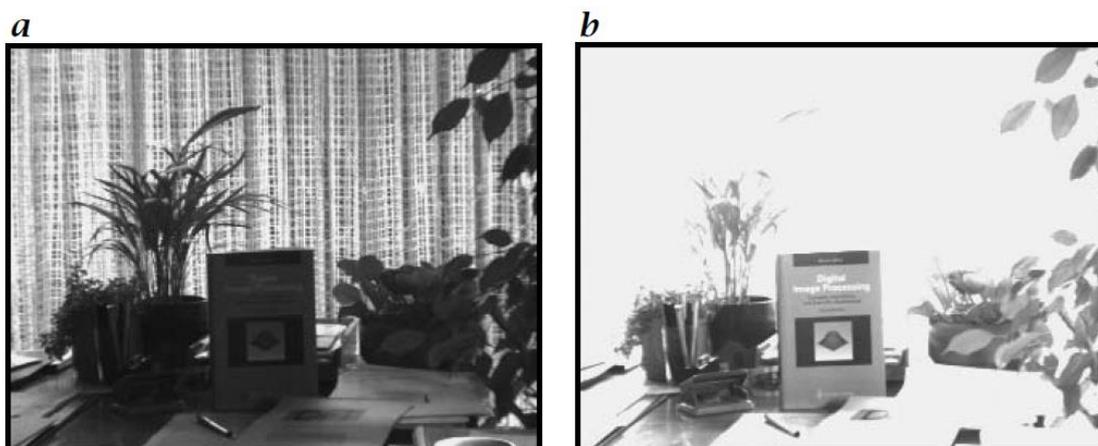
3.4.8 Percepção da Imagem

McAndrew (2015) afirma ainda que grande parte do processamento de imagens se preocupa em fazer uma imagem parecer "melhor" para os seres humanos. Portanto, é importante estar ciente das limitações do sistema visual humano. A percepção da imagem consiste em dois passos básicos: 1) Capturar a imagem com o olho, 2) Reconhecer e interpretar a imagem com o córtex visual do cérebro.

Jähne(2005) afirma que as características do sistema visual humano são bastante diferentes daqueles de um sistema de visão de máquina. Normalmente apenas 256 valores de cinza são resolvidos.

Uma imagem digitalizada tem muito menos dinâmica do que o sistema visual humano. Esta é a razão pela qual a qualidade de uma imagem digitalizada, especialmente de uma cena com alta luminância de contraste, parece inferior para o ser humano em comparação com o que é visto diretamente.

Figura 9 - Uma cena de alto contraste, com: a) Uma pequena abertura e b) Uma grande abertura



Fonte: Jähne (2005, p. 40)

Em um imagem digital tirada de tal cena com um sensor de imagem linear, as partes claras estão superexpostas ou as partes escuras estão subexpostas. A figura 9 demonstra este fato através de cenas de alto contraste, com pequena e grande abertura.

3.5 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM

A Correlação Digital de Imagem, muitas vezes citada pela abreviatura em inglês DIC (*Digital Image Correlation*), é uma das técnicas mais utilizadas na área da mecânica experimental. A técnica DIC está sendo amplamente utilizada nos campos da mecânica e da óptica para medição de deformações.

Para Sutton (2010) o termo correlação digital de imagem refere-se à classe de métodos sem contacto que adquirem imagens de um objeto, armazenam estas imagens em forma digital e realizam sua análise para extrair a forma de campo completo e as medições de deformação.

A técnica DIC consiste em gravar com uma câmera algumas imagens digitais de um espécime submetido a uma transformação mecânica e aplicação de um algoritmo de correlação de imagem com um software apropriado.

Um elemento importante, mas não único, do procedimento de medição é o pacote de *software* de análise de imagem que é suposto fornecer um deslocamento 2D de campo aparente que mapeia uma chamada "imagem de referência" para um "imagem deformada" em um conjunto discreto de posições, de acordo com algum princípio de conservação de fluxo óptico (BORNERT *et al.*, 2009).

Muniandy *et al.* (2019) afirmam que a correlação digital de imagem (DIC) é uma técnica óptica usada para medir os deslocamentos de campo completo com precisões de subpixel e a deformação em uma superfície de um material de deformação progressiva em uma abordagem sem contacto. O princípio básico do DIC funciona por comparar matematicamente os valores de intensidade de cinza de um par de imagens digitais em duas condições diferentes: antes (referência) e após a deformação (atual).

3.1.2 Histórico

A imagem digital originou-se da junção entre imagem e comunicação. Na década de 1920 tem-se os primeiros relatos acerca de imagens digitais, foi quando surgiram as imagens que eram enviadas para os jornais através do telégrafo via cabo submarino entre Londres e Nova York. O grande desafio da transmissão de imagens sempre foi a grande capacidade de comunicação requerida pelos canais de comunicação.

Durante a década de 1950, a necessidade de transmissão televisiva através de longas distâncias exigia a compactação dos sinais de TV tanto quanto possível. Naquela época, já estavam disponíveis os primeiros computadores digitais, porém apenas para grandes empresas e instituições de pesquisa, e a partir de então os pesquisadores começaram a usá-los para investigações em compactação de imagens. Para esses fins, os primeiros dispositivos de entrada e saída de imagem para computadores foram desenvolvidos no final dos anos 1950 até o início dos anos 1960 (YAROSLAVSKY, 2013).

Sutton *et al.* (2017) descrevem que os primeiros estudos relacionados à correlação digital de imagem (DIC) foram relatados na área de fotogrametria⁵. O primeiro trabalho DIC conhecido foi realizado em 1961 por Gilbert Hobrough⁶, cujo foco estava na combinação digital de recursos de duas vistas em perspectiva, para extrair topografia tridimensional de fotografias de reconhecimento obtidas por uma aeronave. Hobrough projetou e construiu um instrumento para correlacionar a fotografia de reconhecimento de alta resolução com fotografia de levantamento de alta precisão, a fim de permitir maior precisão na medição das condições de solo variáveis.

Os autores Peters e Ranson, em 1982, escreveram o artigo intitulado 'Técnicas de imagem digital na análise experimental de tensões', que é considerado um dos trabalhos precursores da técnica de correlação digital de imagens. O método sugeriu uma comparação de imagens digitais para pequenas regiões (denominadas subconjuntos), antes e depois da deformação, localizando as posições de cada um desses subconjuntos após a deformação por meio de análise de imagem digital.

Em 1983, Peters e Ranson, utilizando a correlação digital de imagem, desenvolveram algoritmos numéricos e realizaram experimentos preliminares, usando imagens gravadas opticamente para demonstrar que a abordagem, conhecida hoje como 2D Digital Image Correlation (2D-DIC) era viável.

Anderson *et al.* (1984) realizaram medições de movimento corporal usando algoritmos, demonstrando que ambos os planos e rotações podem ser estimados com segurança por meio de correspondência de imagens 2D-DIC.

⁵ Fotogrametria é a ciência de obter informações confiáveis sobre a propriedade de superfícies e objetos sem contacto físico e medir e interpretar estas informações.

⁶ Gilbert Louis Hobrough (1918-2002), nascido em Toronto/Canadá, é considerado um dos pioneiros da fotogrametria digital.

Chu *et al.* (1985) desenvolveram algoritmos numéricos e realizaram experimentos preliminares usando imagens para mostrar a correlação de imagem para realizar medições de forma, movimento e deformação, esta abordagem é conhecida atualmente como 2D digital image correlation (2D-DIC). Estes autores escreveram o artigo intitulado 'Aplicações de Técnicas de Correlação Digital de Imagem para Mecânica Experimental'.

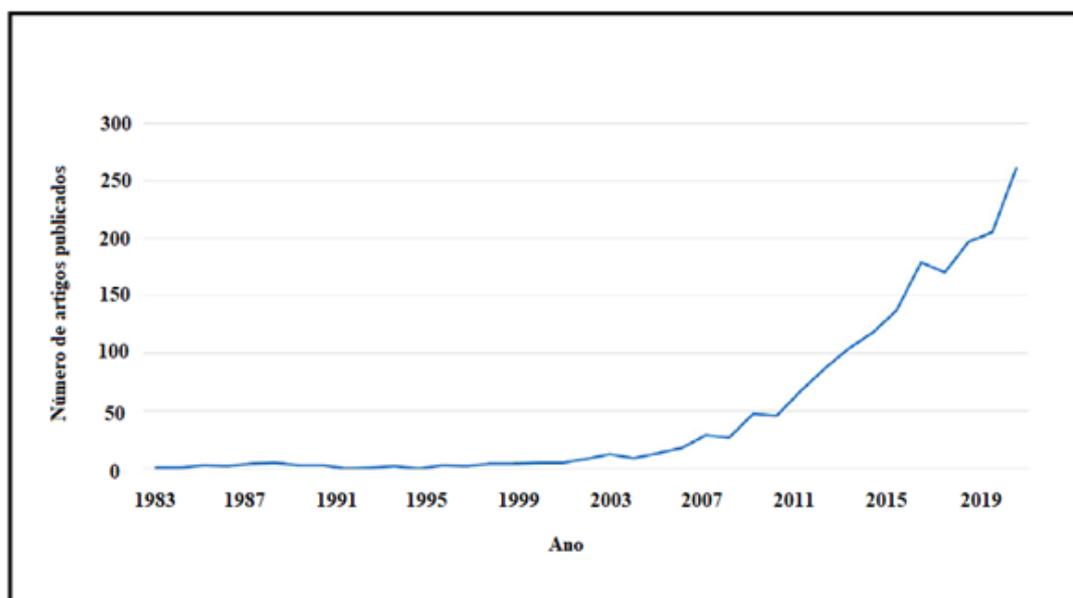
Na década de 1990, foram realizados estudos para avaliar a precisão da técnica DIC. No entanto, na maioria dos casos, os investigadores começaram a aplicar o método para medir deformações superficiais em componentes planos.

Ainda durante a década de 1990 e nos primeiros anos do século 21, ocorreu um crescimento rápido, porém limitado de estudos e aplicações da técnica DIC, que algumas vezes recebeu outra denominação. A partir de 2005, a técnica DIC apresentou um elevado crescimento em sua aplicação no mundo todo.

Hild e Roux (2006) descreveram que o então estado da arte da correlação digital de imagem, cujos deslocamentos poderiam ser determinados para valores menores que um pixel, permite caracterizar melhor o comportamento de materiais e a resposta das estruturas às cargas externas.

Hassan (2021) demonstra que ocorreu uma significativa evolução no número de artigos publicados a cada ano (figura 10), os quais mencionaram a técnica denominada correlação digital de imagem em seus títulos.

Figura 10 - Gráfico com evolução de artigos relacionados ao título correlação digital de imagem



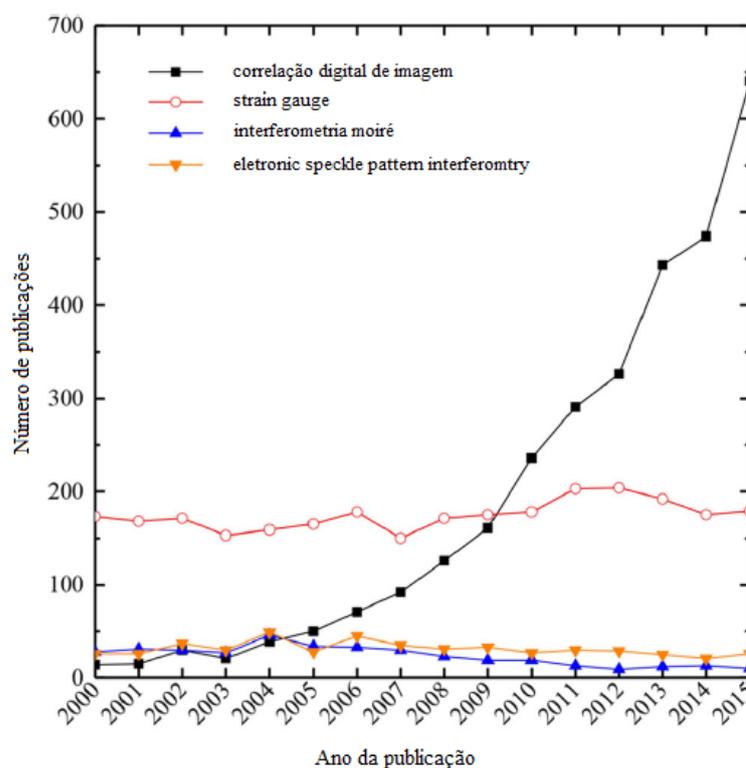
Fonte: Adaptado de Hassan (2021)

Pode-se observar, no gráfico da figura 10, que inicialmente, a técnica não recebia muita atenção. No entanto, desde 2000, o número de artigos publicados a cada ano mencionando DIC aumentou rapidamente. Este baixo número inicial de artigos mencionando DIC pode estar relacionado à complexidade computacional requerida por esta técnica.

Dong e Pan (2017) afirmam que o método DIC continuará sendo o mais popular e a mais importante ferramenta de metrologia na comunidade de mecânica experimental. A figura 11 demonstra a evolução da técnica DIC, no período de 2000 a 2015 e descreve um comparativo com outras técnicas de medição de deformação.

Devido às suas incomparáveis vantagens, tais como: configuração experimental simples, fácil implementação, forte robustez contra vibração ambiente e variação de luz e ampla gama de aplicabilidade com resoluções temporais e espaciais, a técnica DIC tem sido amplamente aceita como uma ferramenta poderosa e flexível para medição de forma, movimento e deformação para vários materiais e estruturas, em diversas escalas temporais e espaciais, e em diferentes ambientes experimentais (DONG; PAN, 2017).

Figura 11 - Evolução do número de artigos envolvendo técnicas de medição de deformações



Fonte: Adaptado de Dong e Pan (2017, p. 1162)

3.5.2 Características

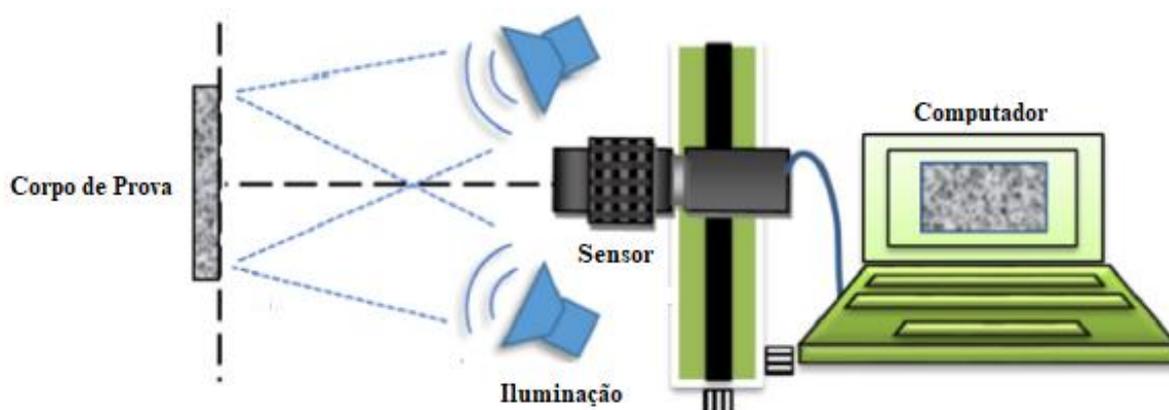
A técnica DIC é o resultado da técnica conhecida como fotografia *speckle*, está também relacionada com a imagem de velocimetria de partículas. O conceito básico de DIC considera que um padrão aleatório é aplicado à amostra, correlacionando sub-imagens do padrão de uma imagem de referência com uma imagem da amostra deformada (AFFONSO, 2011).

A técnica DIC é não destrutiva, trata-se de uma técnica óptica que não necessita de contacto para medição do campo de deformação, o cálculo da deformação é realizado a partir da correlação entre as imagens feitas antes e depois da aplicação de carga.

O termo DIC se refere à classe de métodos sem contacto que adquirem imagens de um objeto, armazenam-nas no formato digital e realizam análise destas imagens para extrair medições de deformação de campo completo. A técnica DIC foi realizada com muitos tipos de padrões baseados em objetos, incluindo linhas, grades, pontos e matrizes aleatórias. Um das abordagens mais comumente usadas emprega padrões aleatórios e compara sub-regiões em toda a imagem para obter um campo completo de medições (SHARPE, 2008).

Niu *et al.* (2018) descrevem que o DIC 2-D no plano, conforme demonstrado na figura 12, deriva do conceito de que a câmera traça o movimento do recurso na superfície da amostra. O sensor da câmera concentra-se na superfície do objeto plano para registrar as imagens do corpo de prova sob cargas diferentes.

Figura 12 - Esquema do sistema de experimento 2D-DIC



Fonte: Adaptado de Niu *et al.* (2018, p. 82)

A técnica DIC é utilizada para medição de deslocamento e deformação de campo completo, que obteve grande aceitação na comunidade de mecânica experimental.

Apesar de suas inúmeras vantagens, a DIC apresenta algumas desvantagens, uma vez que é uma técnica com procedimentos essencialmente iterativos, que leva automaticamente à mobilização de recursos computacionais significativos. Conseqüentemente, seu uso é limitado quando o deslocamento denso (ou seja, definido em pixels) ou distribuições de deformação devem ser medidos. Outra desvantagem é o fato de que o DIC atua como um filtro passa-baixa, o que faz com que os campos de deslocamento e deformação recuperados sejam borrados (BOUKHTACHE *et al.*, 2021).

Aplicações de mecânica experimental geralmente envolvem objetos específicos ou espécimes, e as medidas são frequentemente bem controladas. Para conseguir uma análise DIC fácil e precisa, o objeto e as superfícies devem ter padrões de manchas artificiais.

Na prática, tais padrões podem ser preparados aplicando uma fina camada de tinta *spray* branca na superfície do objeto, seguido por um *spray* de tinta preta para obter padrões de manchas aleatórias. Se o objeto tem deformação ou mudança de forma, forte ligação entre revestimento e o objeto são necessários. No caso de medição de forma apenas, os padrões de manchas podem ser fornecidos por projeção padrão usando um computador e um projetor digital (WANG *et al.*, 2015).

Hassan (2021) afirma que a técnica DIC correlaciona duas seções tiradas de duas imagens diferentes que capturam a superfície da amostra antes e depois do processo de deformação. A imagem que captura o estado da superfície da amostra antes da deformação é chamada de imagem de referência, enquanto a imagem que captura o estado da superfície da amostra após a deformação é chamada de imagem deformada. As seções selecionadas de imagens correlacionadas são normalmente chamadas de subconjuntos. Inicialmente, o subconjunto é selecionado como quadrado em dimensões na imagem que é tirada antes do processo de deformação.

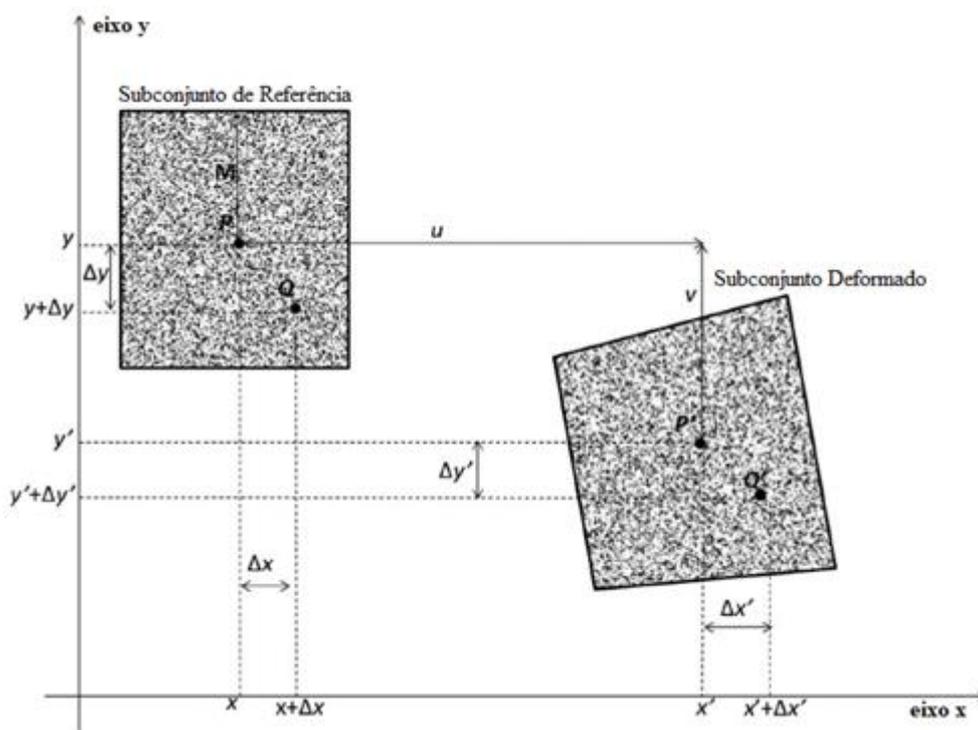
A ideia central da técnica DIC é avaliar os deslocamentos de campo completo por meio de uma série de imagens digitais tiradas da superfície da amostra de teste. O algoritmo de correlação de imagem se propõe a resolver um problema de otimização para combinar cada pequeno subconjunto da imagem de referência atual com o subconjunto correspondente na próxima imagem deformada.

Uma vez obtido o campo de deslocamento, o campo de deformações pode ser posteriormente estimado por meio da diferenciação do campo de deslocamento. A resolução do campo de deformação depende do tamanho da janela de deformação usado no algoritmo de diferenciação. Um tamanho de janela de tensão adequado também é um compromisso de resolução espacial e redução de ruído (HE *et al.*, 2021).

O método DIC trabalha com o princípio de que a deformação na amostra varia continuamente, o que é traduzido nas imagens como: pixels vizinhos de um pixel (ponto de interesse) na imagem de referência permanecerão os mesmos na imagem deformada.

A figura 13 apresenta um subconjunto da imagem de referência tendo o ponto central $P(x, y)$. O subconjunto após a deformação é representado pelo centro $P'(x', y')$ que pode ser girado e/ou inclinado. Para correlacionar os dois subconjuntos, também são necessárias informações sobre seus pixels vizinhos. Portanto, um ponto $Q(x+\Delta x, y+\Delta y)$ é selecionado dentro do subconjunto obtido da imagem de referência.

Figura 13 - Deformação contínua de um subconjunto



Fonte: Adaptado de Hassan (2021)

O mesmo ponto no subconjunto após a deformação será $Q'(x'+\Delta x', y'+\Delta y')$, onde u representa o deslocamento horizontal enquanto v representa o deslocamento vertical do centro $P(x, y)$ do subconjunto retirado da imagem de referência.

Özaslan *et al.* (2021) descrevem em seu trabalho que o principal objetivo do uso do método DIC é monitorar o progresso dos danos nos corpos de prova, neste método, mapas de deslocamento bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D) são obtidos em uma superfície deformada. O método é baseado no reconhecimento dos padrões de manchas criados na superfície e sua diferença antes e depois da carga.

3.5.3 Correspondência de Imagens

Duas premissas principais são geralmente empregadas para converter imagens em medidas experimentais. Primeiro, é assumido que há uma correspondência direta entre os movimentos de pontos na imagem e os movimentos de pontos no objeto. Enquanto essa suposição se mantiver, os movimentos da imagem podem ser usados para quantificar o deslocamento de pontos no objeto. Em segundo lugar, presume-se que cada sub-região tem contraste (variação espacial na intensidade da luz), então a correspondência precisa ser realizada para definir movimentos de imagem. Junto com a primeira suposição, a correspondência precisa ser melhorada permitindo que cada sub-região de imagem possa deformar usando uma forma funcional apropriada e, portanto, aumentar a precisão nos movimentos medidos (SUTTON, 2010).

A correspondência de imagens é uma disciplina da visão computacional de importância central para um grande número de aplicações práticas. Para citar apenas alguns, a correspondência de imagens é usada para resolver problemas de controle de processos industriais, fenômenos de crescimento biológico e mapeamento geológico. Sutton *et al.* (2009) afirmam que a correlação de imagem digital não é exceção, e algoritmos são empregados que levam em consideração a física dos processos de deformação subjacentes.

Remondino *et al.* (2014) afirmam que a correspondência de imagens requer o estabelecimento de correspondências entre dados primitivos extraídos de duas ou mais imagens, junto com a determinação das coordenadas 3D de pontos de recursos combinados por meio de uma colinearidade ou modelo projetivo. No espaço da imagem, este processo produz um mapa que atribui profundidades para cada pixel de uma imagem.

Existem vários conceitos fundamentais relacionados à correspondência de imagem, conforme serão descritos a seguir.

Gao *et al.* (2006) descrevem que o método baseado em correlação é utilizado para combinação de duas imagens não calibradas com rotação significativa e mudanças de escala. Este método emprega rotação e escala com correlação cruzada normalizada invariante definida como a medida de similaridade entre dois pontos de interesse.

O cálculo de correlação cruzada normalizada adapta o tamanho e a orientação da janela de correlação de acordo com a escala característica e a direção dominante do pontos de interesse. A figura 14 demonstra o resultado de correspondência para o par de imagens de uma residência com mudanças de rotação e escala.

Figura 14 - Resultado de correspondência para duas imagens de uma residência



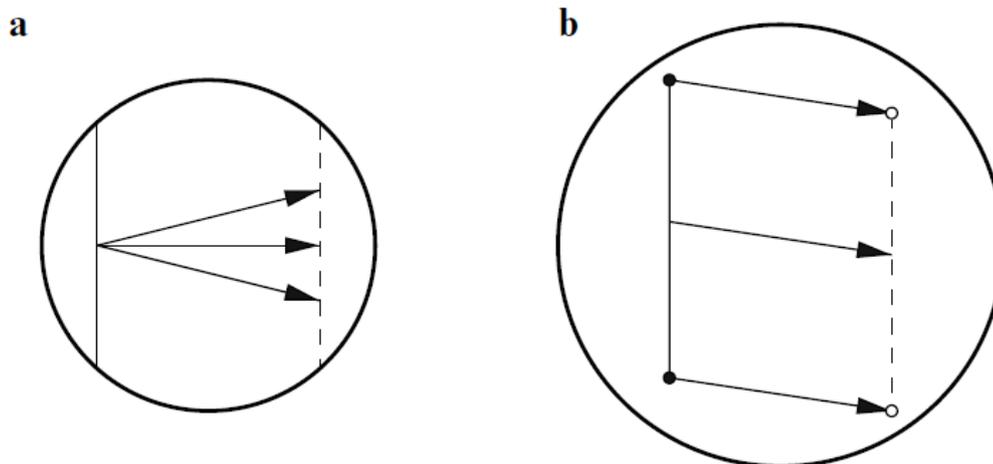
Fonte: Adaptado de Gao *et al* (2006, p. 731)

3.5.3.1 O Problema da Abertura

Sutton *et al.* (2009) afirmam que geralmente não é possível encontrar a correspondência de um único pixel em uma imagem em uma segunda imagem. Normalmente, o valor de cinza de um único pixel pode ser encontrado em milhares de outros pixels na segunda imagem, e não há correspondência única.

A figura 15 demonstra o problema da abertura na correspondência de imagens: a) Um ponto na linha pode corresponder a pontos arbitrários na linha deslocada, b) A abertura foi aumentada para incluir os pontos finais da linha, o vetor de movimento agora é único.

Figura 15 - O problema de abertura na correspondência de imagem: a) Um ponto na linha, b) A abertura aumentada



Fonte: Sutton *et al.* (2009, p. 82)

O fluxo óptico é a medida do movimento de um objeto projetado no plano de imagem de uma câmera. Uma série de métodos foram propostos para calcular fluxos visuais usando sensores baseados em eventos. Embora esses métodos, os quais são representados principalmente por algoritmos, tenham melhorado a precisão do fluxo de eventos, eles são limitados a cálculos de fluxos densos locais.

Independentemente da direção de movimento verdadeiro, o fluxo obtido é sempre calculado como ortogonal à aresta. Assim, o cálculo do fluxo é suscetível ao gradiente da borda. Este problema é conhecido como o problema da abertura.

A única maneira de lidar com o problema de abertura através de um método tradicional de ajuste de plano é aumentar o tamanho da vizinhança espacial em torno dos eventos, mas isso pode levar a erros quando o tamanho real do objeto é desconhecido e a forma do objeto pode não permanecer linear.

Os algoritmos atuais de última geração perdem a dinâmica temporal dos eventos do sensor de entrada conforme eles requerem o agrupamento de eventos em uma janela temporal e espacial para evitar problema de abertura (AKOLKAR; IENG; BENOSMAN, 2020).

3.5.3.2 O Problema da Correspondência

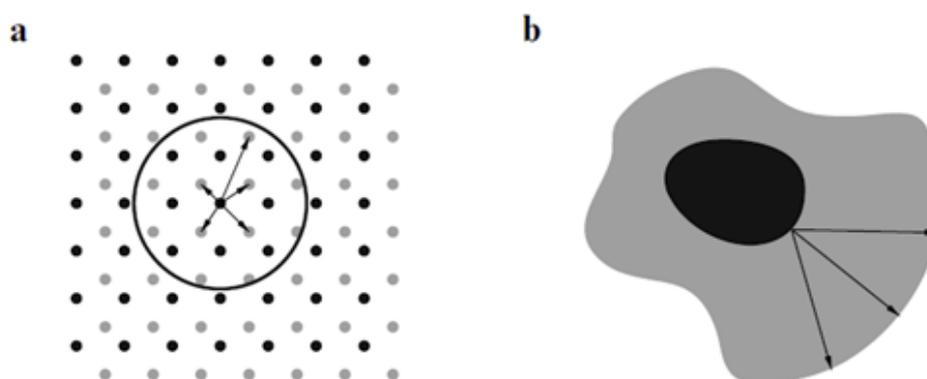
Sutton *et al.* (2009) depreendem que o problema da abertura é um caso especial do problema de correspondência mais geral. Existem muitas situações em que uma correspondência única entre recursos em duas imagens não pode ser estabelecida.

Para uma repetição estrutural, como uma grade de pequenos pontos, o movimento só pode ser resolvido até um múltiplo desconhecido da constante da grade.

Devido aos minúsculos deslocamentos que muitas vezes são de interesse em aplicações de engenharia, os requisitos de resolução são muito maiores do que para a maioria das outras aplicações. Para medir com precisão a curva tensão-deformação para muitos materiais de engenharia, mudanças de comprimento na ordem de 10^{-5} m/m devem ser resolvidas. Esses requisitos levaram ao desenvolvimento de muitos algoritmos voltados para fornecer alta resolução com sistemática que minimiza os erros (SUTTON, M. A.; ORTEU, J.J.; SCHREIER, 2009).

A figura 16 demonstra o problema de correspondência, em duas situações: a) Uma estrutura repetitiva, onde uma correspondência única só será encontrada se a borda da grade estiver incluída na abertura, b) Uma deformação sem textura, onde nenhuma correspondência pode ser estabelecida sem outras suposições.

Figura 16 - Problema de correspondência: a) Uma estrutura repetitiva, b) Uma deformação sem textura



Fonte: Sutton *et al.* (2009, p. 83)

Tushev (2017) afirma que existem várias maneiras de resolver o problema de correspondência. Entretanto, a detecção de características é a abordagem mais popular. Os métodos que utilizam esta abordagem analisam imagens e procuram recursos, tais como: cantos, saliências, pontos de contraste, etc.

Um valor numérico, chamado descritor, é calculado a partir dos dados da imagem com base em alguma vizinhança. Esta abordagem nos permite encontrar correspondências de pontos quase que instantaneamente, combinando o valor numérico dos descritores, os detectores de características locais são robustos contra a maioria das transformações de imagem (causado pelo movimento da câmera), visto que as condições de iluminação permanecem as mesmas.

3.5.3.3 Padrão de Textura

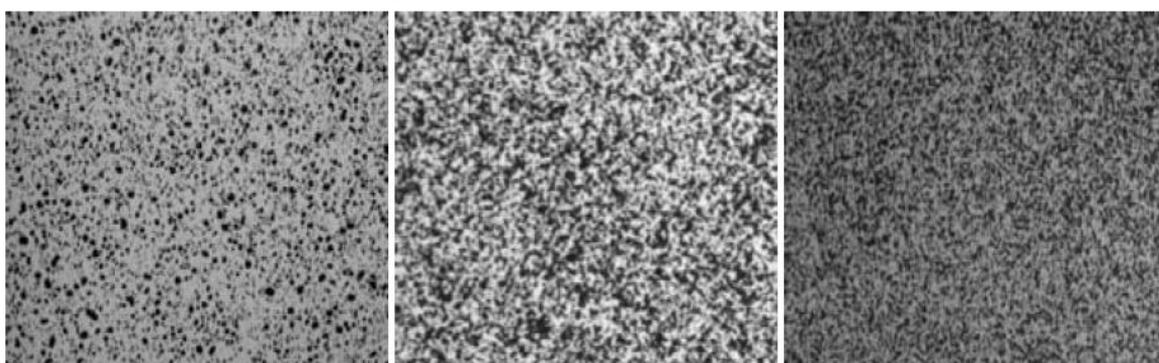
De um modo geral, a implementação de técnicas DIC para medições de forma, movimento e deformação consiste em três etapas: padrão de textura, aquisição de imagens e análise de imagem.

Como portador de informações de deformação, o padrão de textura deve ter algum tipo distinto, único, não periódico e escala de cinza estável para realizar medições DIC precisas.

Para realizar medições DIC precisas, um bom padrão de textura deve atender a vários requisitos, tais como: alto contraste, aleatoriedade, isotropia e estabilidade. Diferentes padrões de textura podem ser realizados por diferentes operadores usando as mesmas técnicas, porque a tecnologia e os parâmetros desempenham um papel fundamental em cada técnica (DONG; PAN, 2017).

Sutton *et al.* (2009) afirmam que para resolver o problema de correspondência de maneira única, a superfície do objeto deve exibir certas propriedades, estruturas orientadas, como linhas, limitam a determinação dos vetores de movimento ao componente ortogonal à estrutura. O padrão de textura ideal deve ser isotrópico, ou seja, não deve apresentar uma orientação preferida. A figura 17 demonstra os padrões típicos utilizados.

Figura 17 - Padrão de texturas típicos



Su *et al.* (2017) afirmam que os métodos numéricos só podem determinar os parâmetros ideais de padrão de textura em alguns casos particulares, pois é impossível conduzir um experimento numérico para todos os possíveis parâmetros. Além disso, os métodos numéricos são incapazes de fornecer uma visão física profunda. Neste caso, há uma forte necessidade de construção de um modelo teórico.

O padrão de textura é comumente usado como portador de deformação em medições DIC. Ele tem recursos de imagem bem controlados e fornece grandes gradientes de intensidade média necessários para correspondência DIC, baseada em subconjuntos precisos de pontos de controle. Na maioria dos casos, os padrões de textura capturados em diferentes poses são significativamente traduzidos, dimensionados e girados em relação ao padrão de manchas simulado. Portanto, as abordagens de pesquisa de deslocamento regular geralmente falham em fornecer uma estimativa inicial confiável para cada ponto de cálculo (CHEN; PAN, 2020).

3.5.4 Funções de subconjunto de formas

Em muitas aplicações de engenharia, a medição de deslocamento de campos é complexa, e o corpo de prova pode sofrer alongamento, compressão, cisalhamento ou rotação. Um subconjunto de referência inicialmente quadrado pode assumir uma forma consideravelmente distorcida em uma imagem posterior após a deformação.

Xu *et al.* (2015) descrevem que o método DIC é uma medição óptica sem contacto de campo completo que utiliza rastreamento de marcadores de textura dentro da região da imagem (subconjunto). Neste processo, funções de correlação são usadas para avaliar o grau de semelhança entre as imagens de referência e deformadas.

Para estabelecer as correspondências entre duas imagens, são utilizadas técnicas numéricas para localizar um subconjunto de imagem quadrada em uma imagem de referência dentro de uma imagem sob carga. Durante este processo, as funções de forma de ordem variada podem ser aplicadas ao subconjunto inicialmente quadrado (SCHREIER; SUTTON, 2002).

Bornet *et al.* (2009) afirmam que a não ocorrência de erro de deslocamento sistemático é observada se for usada uma função de forma de segunda ordem e que a função de correlação é minimizada quando a diferença entre a função de forma e o deslocamento de campo real codificado nas imagens também é minimizado e ainda

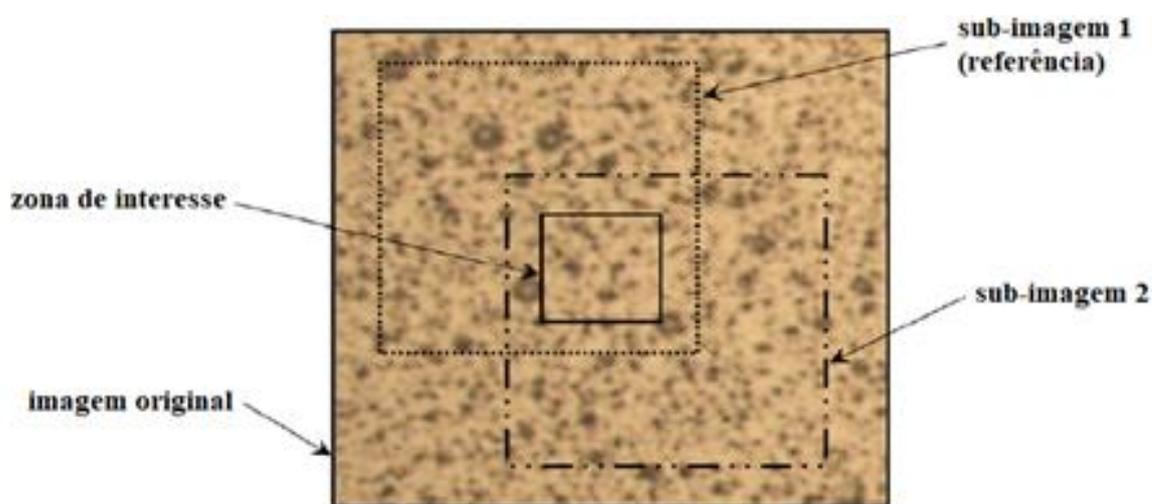
que a escolha ideal do tamanho do subconjunto e da função de forma pode levar a melhorias nas medições através do método DIC.

Sutton *et al.* (2009) afirmam que ao considerarmos uma imagem que é girada lentamente em torno de seu centro, conforme o ângulo de rotação aumenta, a similaridade entre o subconjunto original e o subconjunto girado diminui, este fenômeno é muitas vezes referido como decorrelação.

3.5.5 Zona de Interesse

Saletti e Forquin (2015) afirmam que uma região de interesse (ROI) é definida em uma imagem de referência e é criada uma grade de malha com tamanho definido pelo usuário. Os elementos desta malha também são chamados de Zona de Interesse (ZOI), o método DIC é sensível à resolução da imagem e ao tamanho da zona de interesse que tem grande influência na qualidade dos resultados.

Figura 18 - Princípio do "deslocamento perfeito"



Fonte: Haddadi e Belhabib (2009, p. 190)

Haddadi e Belhabib (2008) descrevem em seu trabalho o princípio do “deslocamento perfeito”, que conforme observa-se na figura 18, as subimagens 1 e 2 são escolhidas na imagem original de forma que a zona de interesse pertença a ambas. O campo de deslocamento não é igual a zero, pois cada pixel na zona de interesse possui coordenadas diferentes nas subimagens 1 e 2. O campo de deformação, entretanto, é igual a zero porque a zona de interesse não foi deformada.

3.6 MATERIAIS UTILIZADOS NOS CORPOS DE PROVA

Este trabalho utilizou corpos de prova de alumínio e compósitos a base de juta, malva e lama vermelha. A seguir serão demonstrados dados e características relacionadas a estes materiais.

3.6.1 Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento mais encontrado na crosta terrestre e o mais abundante entre os elementos metálicos. Suas propriedades, tais como: leveza, alta condutividade elétrica, grande resistência à corrosão e baixo ponto de fusão, permitem que seja utilizado de forma extensiva para a produção de diversos itens, tais como ligas metálicas, laminados e extrudados. Excetuando-se o ferro, o uso do alumínio excede o de qualquer outro metal. É um material importante em múltiplas atividades econômicas, como exemplo podemos citar as indústrias: metalúrgica, aeronáutica, farmacêutica e alimentícia (CARDOSO *et al.*, 2011).

Cardoso *et al.* (2011) descrevem ainda que a obtenção do alumínio na forma metálica segue um processo que se inicia, usualmente, na mineração da bauxita, seguida do seu beneficiamento. A bauxita beneficiada segue para a refinaria, onde passa por tratamento químico para a extração das impurezas, dando origem a um produto intermediário denominado alumina. A etapa final consiste em transformar a alumina em alumínio primário, na forma metálica, por meio da eletrólise. A bauxita é, geralmente, encontrada de forma abundante em locais de clima tropical a subtropical. Como regra geral, necessita-se de pouco mais de 5kg de bauxita para produzir 1kg de alumínio.

O Brasil possui cerca de 7% das 27,1 bilhões de toneladas, que é a estimativa das reservas mundiais de alumínio. Cerca de 95% de toda a bauxita é usada para produção de alumina pelo processo Bayer⁷.

O uso do alumínio no segmento de transporte permite a redução dos gastos com combustível em decorrência de seu menor peso específico, principalmente quando comparado ao aço. Características como resistência física e à corrosão também permitem sua utilização na indústria naval, com aplicação em estruturas e em moldagem (CARDOSO *et al.*, 2011).

⁷ O processo Bayer foi desenvolvido pelo químico austríaco Karl Joseph Bayer, em 1888. Este processo é especialmente aplicável a bauxitos gibbsíticos.

3.6.2 Juta

Benchimol (2013) descreve que no início da década de 1930 o Sr. Isukasa Uetsuka, fundou a Companhia Industrial Amazonense, que se instalou num local próximo a Parintins, em Vila Amazônia, seus principais objetivos eram promover a imigração e colonização japonesa no Amazonas e introduzir, na região, a Juta Indiana. A aclimação da Juta foi realizada pelo Sr. Riota Oyama, que conseguiu obter sucesso em suas experiências, proporcionando a colheita, em 1937, das primeiras nove toneladas desta importante fibra.

A cultura da juta transformou a paisagem agrícola, econômica e cultural do Baixo e Médio Amazonas pelas seguintes razões: a) Cultura de pequeno ciclo, típica das várzeas, aproveitando a riqueza dos sedimentos trazidos pelas águas barrentas do rio Amazonas, b) Regime de economia familiar, c) crédito bancário oficial, e d) Apoio das indústrias de fiação e tecelagem instaladas em Manaus, Parintins, Santarém e Belém, que garantiram o abastecimento de sacaria para acondicionar as grandes safras de grãos produzidos no Centro-Sul (BENCHIMOL, 2013).

A Juta é composta de 64% de celulose, 12% de hemicelulose, 12% de lignina e outras substâncias. Através do uso de técnicas microscópicas verifica-se que a juta é uma fibra densa, fortemente aglomerada e de difícil isolamento em filamentos elementares. A coleta da juta é realizada em regiões pantanosas, a planta é batida até que sejam obtidas somente as fibras, que através do processo denominado maceração, são retiradas da casca do caule. As fibras de juta são chamadas comercialmente de “fibras mole”, sendo utilizadas na confecção de telas e tecidos de aniagem, cordas, bartantes e tapetes (RODRIGUES, 2014).

3.6.3 Malva

A Malva pertence à família das *Malvaceae*, que compreende várias espécies, tais como: a *Urena Lobata L.* e a *Malva Sylvestris*. Originária da Ásia, a Malva é hoje cultivada em áreas às margens de rios, principalmente na região Amazônica. A fibra de Malva tem sido de interesse econômico para produção têxtil em áreas de baixa renda. Testes preliminares com fibra de malva revelaram resistência à tração de 214-497 MPa e Módulo de Young de 8,8 Gpa, estes valores são superiores aos das fibras naturais tradicionais, como bambu e côco. A fibra de malva só recentemente passou a ser investigada como possível reforço em compósitos para aplicação em engenharia (BRAGA *et al.*, 2015).

As fibras de malva são oriundas do cultivo temporário desta espécie; devido às suas diversas aplicações nas indústrias nacionais e internacionais, representam uma grande oportunidade de investimento, através de explorações produtivas e com técnicas específicas, além do fato de se contrapor ao uso da fibra sintética que podem causar danos ao meio ambiente, em função da sua difícil decomposição após o descarte. As fibras de malva levam cerca de dois anos para se decomporem após o seu desuso, não agredindo o meio ambiente (MARGEM, 2013).

3.6.4 Lama Vermelha

Da denominação em inglês “Red Mud”, a Lama Vermelha é um resíduo insolúvel, resultado da diluição da alumina da bauxita, esta denominação é decorrente da cor predominante do óxido de ferro. Pelo fato dos óxidos e hidróxidos de ferro serem praticamente insolúveis em soluções alcalinas, encontram-se em sua totalidade na lama vermelha. É importante salientar que esta insolubilidade não é absoluta e há uma dissolução muito pequena de ferro em forma de ferrito de sódio, cuja fórmula química é FeO_2Na (CUNHA, 2015).

Cunha (2015) descreve que a viabilidade do uso de lama vermelha como carga depende das características intrínsecas do resíduo e da interação interfacial poliéster/lama vermelha visando atender a redução de custo e melhorias das propriedades físicas e mecânicas do produto elaborado.

A grande quantidade de resíduos sólidos, decorrentes da extração mineral e metalúrgica, representa um sério problema sócio-ambiental. As características físico-químicas destes resíduos despertam grande interesse para outras indústrias. Uma proeminente consumidora de uma boa parte deste material é a indústria cerâmica. Neste contexto, a reciclagem da lama vermelha, que é o principal rejeito industrial da fabricação de alumina pode ser útil na fabricação de diferentes tipos de agregado para ser utilizado na produção de concreto para a construção civil (SOUZA, 2010).

Cunha (2015) afirma que em todo o mundo há uma grande preocupação com a reciclagem e reutilização do resíduo de bauxita, denominado lama vermelha, resultado do processo Bayer, devida às características físico-químicas deste material.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

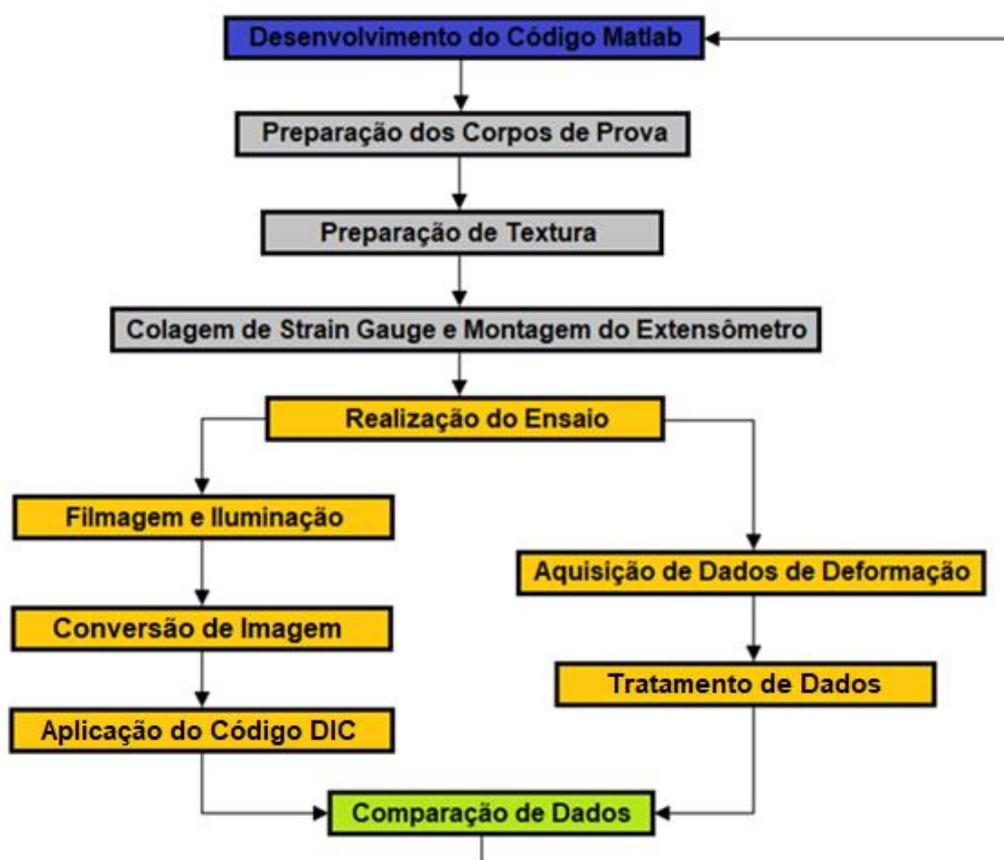
Nesta seção, são descritos os procedimentos adotados para aplicação do método de Correlação Digital de Imagem, utilizando equipamentos de imagem, com recursos do *software* Matlab.

4.1 Etapas dos Procedimentos Experimentais

As etapas relatadas neste item são um resumo dos procedimentos adotados durante os ensaios de tração uniaxial dos corpos de prova. Estes procedimentos visam a utilização da máquina de ensaio AROTEC com obtenção de imagens durante o ensaio com posterior aplicação do *software* Matlab para aplicação da técnica de Correlação Digital de Imagem (DIC).

A figura 19 demonstra a sequência dos procedimentos experimentais que foram adotados para realização dos ensaios dos corpos de prova para posterior aplicação da técnica de Correlação Digital de Imagem (DIC).

Figura 19 - Fluxograma dos Procedimentos Experimentais



Fonte: Próprio autor (2022)

4.1.1 Desenvolvimento do Código Matlab

Foram desenvolvidos dois algoritmos, denominados *scripts* I e II. O *script* I realiza a correlação das imagens basicamente através da ferramenta componente da *toolbox image* do Matlab denominada *cpcorr*⁸, ferramenta de alta precisão (subpixel), adequada à medida de pequenas deformações, podendo realizar correlações com deslocamentos máximos entre imagens de 4 *pixels*. Já o *script* II, antes de realizar a correlação usando a ferramenta *cpcorr*, realiza uma aproximação inicial por meio da ferramenta *normxcorr2*, menos precisa que *cpcorr*, contudo por vezes necessária quando há dentro da série, grandes deformações localizadas ou mesmo quando o material ensaiado apresenta características de superelasticidade.

Os algoritmos desenvolvidos permitem a análise e cálculo dos deslocamentos e deformações ocorridos nos corpos de prova durante o ensaio, estes códigos viabilizam: a confecção de gráfico de deformação, a confecção de imagem do corpo de prova no momento de ruptura em pixel, a escolha do grid pelo usuário (número de linhas e colunas), acompanhamento da evolução da deformação imagem-a-imagem do corpo de prova e a definição do valor da deformação no momento de ruptura.

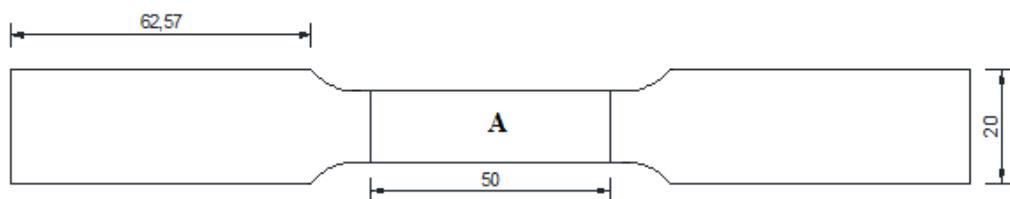
4.1.2 Preparação dos Corpos de Prova

Para a realização das medidas de deformação longitudinal e transversal, foram preparados corpos de prova de tração de alumínio, segundo a norma ABNT NBR 7549; corpos de prova de polímero epóxi e de poliéster plenos, segundo a norma ASTM D 638; e corpos de prova de compósitos laminados de matriz epóxi com reforço de tecido de juta (3 camadas), compósitos de matriz poliéster e reforço de fibras unidirecionais de juta, compósitos poliéster com lama vermelha e compósitos de matriz poliéster e reforço de fibras unidirecionais de malva, todos segundo as norma ASTM D 3039.

Os corpos de prova de alumínio foram usinados a partir de uma chapa, seguindo as dimensões da norma ABNT NBR 7549, conforme desenho esquemático mostrado na figura 20. Foram confeccionados 08 corpos de prova, os quais foram inicialmente lixados e polidos para posterior aplicação, através de *spray*, de tinta branca e preta sobre a área A, compondo a textura.

⁸ O *cpcorr* é uma ferramenta do Matlab que define regiões em torno de cada ponto de controle no movimento da imagem e ao redor do ponto de controle correspondente na imagem fixa e, em seguida, calcula a correlação entre os valores em cada pixel na região

Figura 20 - Corpo de prova de alumínio



Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 21 demonstra o padrão de textura aplicado aos corpos de prova PB01 e PB02, da série de amostras de alumínio ensaiadas.

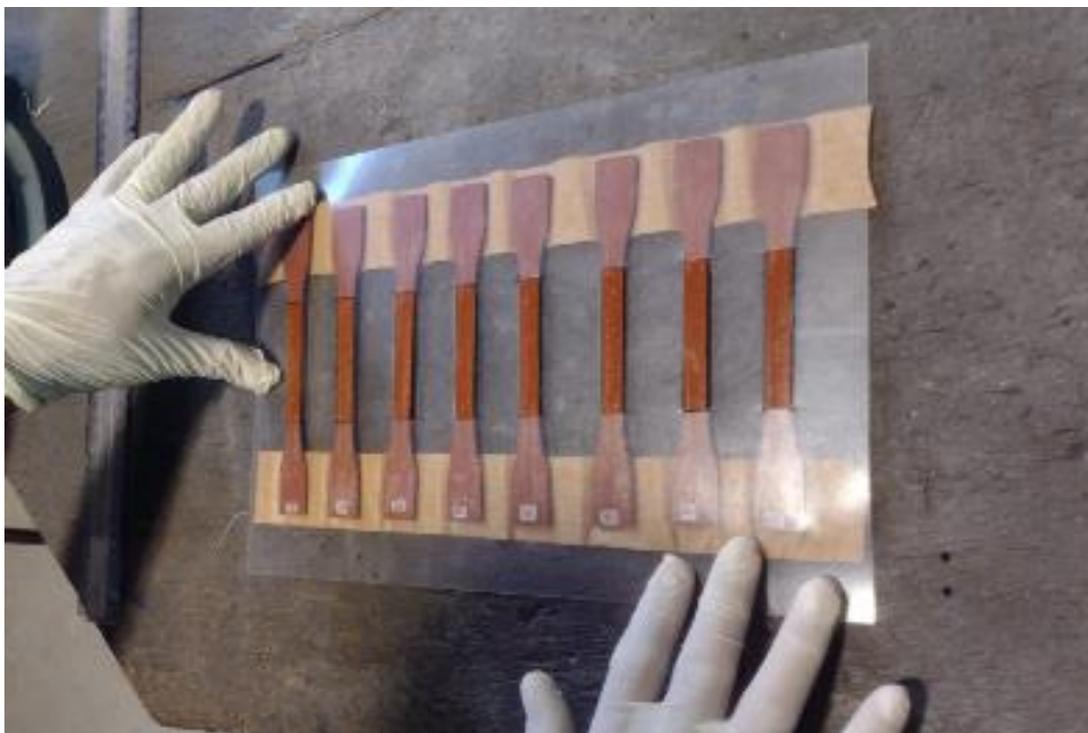
Figura 21 - Padrão de textura dos corpos de prova de alumínio PB01 e PB02



Fonte: Próprio autor (2022)

Os corpos de prova de polímero epóxi e polímero poliéster plenos, assim como os compósitos de matriz poliéster e compósitos poliéster com lama vermelha foram moldados em moldes de silicone, para posterior aplicação da textura na área útil das amostras. A figura 22 ilustra os corpos de prova de compósitos poliéster com lama vermelha sendo preparados para a aplicação da textura.

Figura 22 – Preparação dos corpos de prova de Compósito Poliéster com Lama Vermelha para aplicação de textura



Fonte: Próprio autor (2022)

Os corpos de prova dos compósitos de matriz epóxi com reforço de tecido de juta, bem como os compósitos de matriz poliéster com reforço de fibra unidirecionais de juta e de malva, foram cortados de placas fabricadas por infusão, com nível de vácuo de 101,3 kPa e 30% de fração volumétrica de fibra.

4.1.3 Preparação da Textura

Inicialmente foi realizada a limpeza dos corpos de prova com utilização de material não corrosivo. Em seguida, foi realizada a aplicação da tinta *spray* (figura 23), na cor branca sobre a superfície a ser analisada. Posteriormente, após alguns minutos, para secagem foi aplicada tinta *spray*, na cor preta, de padrão aleatório, de maneira uniforme, de tal forma que a tinta apresentasse aspecto salpicado.

Figura 23 – Preparação da textura



Fonte: Próprio autor (2022)

Esta aplicação de tinta *spray*, na técnica DIC, recebe a denominação de padrão de textura e é o responsável por gerar os pontos de interesse que serão rastreados ao longo do processo de deformação.

O padrão de textura realizado atendeu às características necessárias para obtenção de bons resultados na técnica DIC, ou seja, apresentou um alto contraste e uma boa homogeneidade.

4.1.4 Colagem de Strain Gauge e Montagem de Extensômetro

Nos ensaios de tração realizados foi utilizado extensômetro mecânico, fabricante SANJ, modelo YSJ50/10-ZC e *strain gauges* com 120 ohms de resistência. O extensômetro foi fixado (figura 24) ao corpo de prova através de ligas de látex.

Figura 24 - Instalação do Extensômetro



Fonte: Próprio autor (2022)

Os *strain gauges* foram fixados ao corpo de prova por meio de adesivo instantâneo rígido (figura 25). Em seguida, foram feitas as conexões dos cabos para transmissão de dados entre o extensômetro e o *strain gauge* com o módulo de aquisição de dados.

Figura 25 - Colagem de Strain Gauge



Fonte: Próprio autor (2022)

Os *strain gauges* são dispositivos de extensometria com dimensões muito pequenas, que requerem cuidado extremo no manuseio. Após a colagem, é necessária a soldagem entre os cabos do *strain gauge* que são extremamente delgados e os cabos a serem conectados ao módulo de aquisição de dados (ver item 4.1.9).

A figura 26 demonstra um corpo de prova após a colagem e soldagem de cabos de um *strain gauge*.

Figura 26 – Corpo de Prova com *Strain Gauge*



Fonte: Próprio autor (2022)

4.1.5 Realização do Ensaio

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios AROTEC WDW 100E, com velocidade de ensaio de 2 mm/min, conforme ilustrado na figura 27. A captura das imagens foi realizada através de câmera CANON, mod. EOS REBEL T3i, com lente EF-S 18-55mm, com resolução igual a 18 megapixel.

Figura 27 - Máquina de tração



Fonte: Próprio autor (2022)

4.1.6 Filmagem e Iluminação

Os corpos de prova foram fixados às garras da máquina de tração, em seguida foi realizada a fixação e ajustado o posicionamento da câmera fotográfica na própria máquina de tração (figura 28), com ajuste da altura e distância em relação ao corpo de prova. Foi verificado, através do visor da câmera, se a imagem se encontrava perpendicular ao plano da superfície do corpo de prova e corretamente enquadrada. Posteriormente, foi verificado se o foco da câmera era adequado e em seguida foi instalada iluminação, através de lâmpada de LED, de forma a não causar reflexos de luz e/ou sombras. Finalmente, a câmera foi ligada para iniciar a gravação do ensaio.

Figura 28 - Filmagem dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor (2022)

4.1.7 Conversão de Imagem

Os tempos dos vídeos obtidos através da filmagem apresentaram valores distintos; entretanto, estes vídeos foram convertidos em 200 (duzentas) imagens sequenciais através do software *Free Studio*. Estas imagens foram utilizadas nos códigos em Matlab para determinação dos valores de deformação.

4.1.8 Aplicação do Código DIC

Os vídeos realizados dos corpos de prova, durante a aplicação de carga uniaxial pela máquina de tração, foram convertidos em 200 (duzentas) imagens. Os códigos desenvolvidos em Matlab, inicialmente solicitam a escolha dos arquivos com estas imagens, algumas imagens são excluídas, principalmente aquelas após a ocorrência da ruptura, pois são desnecessárias e sua exclusão diminui o tempo de execução do código.

Após a escolha das imagens, o código solicita a definição da região de interesse, onde será realizada a correlação das imagens. Posteriormente o usuário deverá informar o *grid*, ou seja, o número de linhas e colunas a serem considerados. Apesar

do *grid* ser definido pelo código, ele pode ser modificado pelo usuário durante sua execução, não são raras as vezes que torna-se necessária a modificação do *grid* estabelecido pelo código, em consequência das constantes diferenças entre as áreas de interesse, que variam muito de acordo com as dimensões do corpo de prova. Um outro fato que merece destaque é o tempo de execução do código é proporcional à quantidade de pontos no *grid* a serem rastreados.

O código é executado de forma iterativa onde é demonstrada a evolução dos pontos que referem-se ao *grid*. Ao final, os códigos demonstraram os gráficos de deformação e imagens dos corpos de prova com o mapeamento desta deformação.

4.1.9 Aquisição de Dados de Deformação

Os dados de deformação foram obtidos através da técnica DIC, do extensômetro e do *strain gauge*. No caso da técnica DIC, o cálculo das deformações foi executado aplicando-se os códigos do Matlab, de forma iterativa nas imagens convertidas a partir dos vídeos.

A obtenção dos dados de deformação do extensômetro e *strain gauge* foi viabilizada através do equipamento denominado módulo de aquisição de dados.

Figura 29 – Módulo de aquisição de dados com computador conectado



Fonte: Próprio autor (2022)

O módulo de aquisição de dados possui 6 canais para conexão com dispositivos de extensometria. Durante os ensaios foram utilizados 2 canais, um para o extensômetro e outro para o *strain gauge*.

O módulo de aquisição de dados é conectado a um computador com *software* compatível, este *software* além de viabilizar a obtenção e gravação dos dados de deformação, ainda fornece uma planilha eletrônica com estes dados, o que facilita consideravelmente sua posterior análise. A figura 29 demonstra os canais de conexão do módulo de aquisição de dados e o computador dotado de *software* para gravação dos dados.

4.1.10 Tratamento de Dados

Os dados de deslocamento e deformação obtidos através do extensômetro e dos *strain gauges* foram então compilados em planilha eletrônica, convertendo-se todos os dados para deformação, seguindo os procedimentos definidos em cada norma utilizada.

Após a aplicação dos algoritmos dos *scripts* I e II sobre o conjunto de imagens gerados para cada corpo de prova, os dados de deslocamento e deformação foram obtidos e exportados para planilha eletrônica de forma a serem confrontados com os dados obtidos por meios das técnicas convencionais de extensometria utilizadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados demonstrados neste item são decorrentes da aplicação do método de Correlação Digital de Imagem (DIC), o qual se baseia na correlação entre as imagens do corpo de prova antes da aplicação de carga (imagem de referência) e após a aplicação de carga (imagem deformada).

Os demais valores de deformação foram obtidos pelo extensômetro e pelo *strain gauge* cuja leitura e gravação foi viabilizada pelo módulo de aquisição de dados utilizado.

5.1 Alumínio

O método de validação inicialmente escolhido para a certificação dos resultados obtidos nos ensaios foram os dados obtidos na máquina de tração, os quais foram comparados aos dados calculados através dos *scripts* em Matlab, denominados *Script* I e *Script* II.

A figura 30 demonstra a primeira imagem do primeiro corpo de prova de alumínio chamado PB01, a qual foi obtida através da conversão da filmagem (realizada durante o ensaio) em 200 fotos, sendo a referida imagem correspondente à primeira foto.

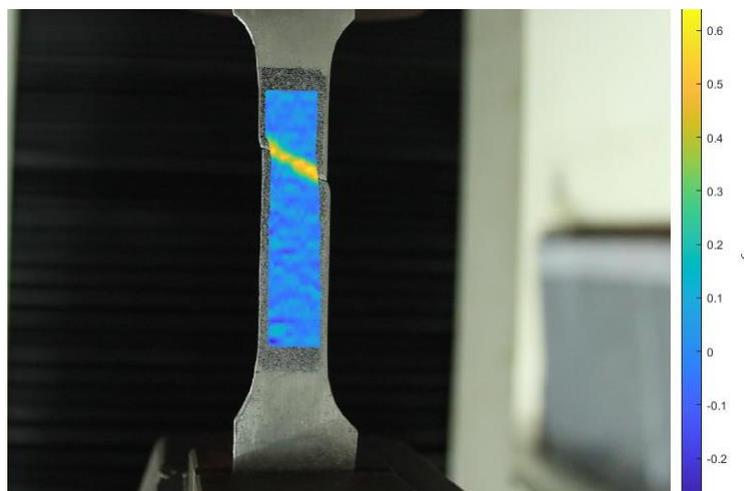
Figura 30 - Corpo de prova de alumínio (PB01)



Fonte: Próprio autor (2020)

A figura 31 demonstra o resultado da aplicação do *Script I*, do Matlab com a utilização das imagens obtidas através da filmagem do corpo de prova durante o ensaio de tração, o tom em amarelo da imagem descreve exatamente o local onde ocorreu a ruptura.

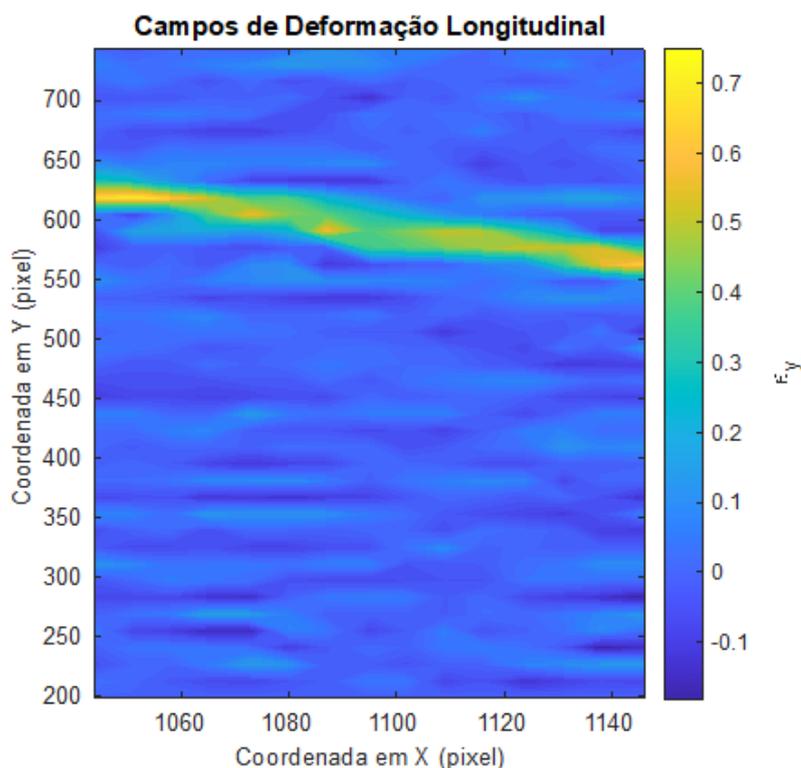
Figura 31 - Imagem do corpo de prova de alumínio (PB01) obtida pelo script I do Matlab



Fonte: Próprio autor (2021)

A figura 32 demonstra o resultado da aplicação do *script* I, do Matlab com a utilização das imagens obtidas através do vídeo em fotos do corpo de prova durante o ensaio de tração, o tom em amarelo da imagem, a exemplo da imagem anterior, descreve os pontos de ruptura, neste caso são demonstradas as coordenadas em pixel da imagem.

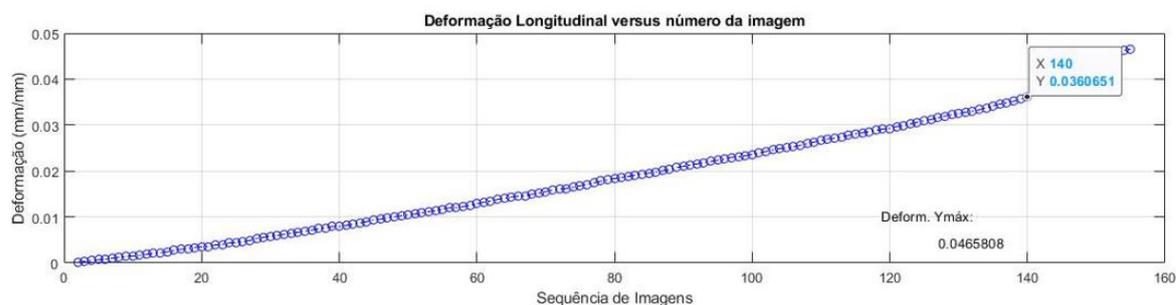
Figura 32 - Imagem do corpo de prova de alumínio (PB01) obtida pelo *script* I do Matlab em pixel



Fonte: Próprio autor (2021)

A figura 33 demonstra o gráfico da deformação longitudinal do corpo de prova de alumínio (PB01) obtido através do *script* I, do programa Matlab. É importante salientar que a deformação é obtida através da sequência de imagens, no caso a filmagem foi convertida em 200 imagens, e a ruptura ocorreu na imagem número 140, conforme pode ser observado, o valor da deformação obtido pelo *script* é igual a 0,0360651 (mm/mm).

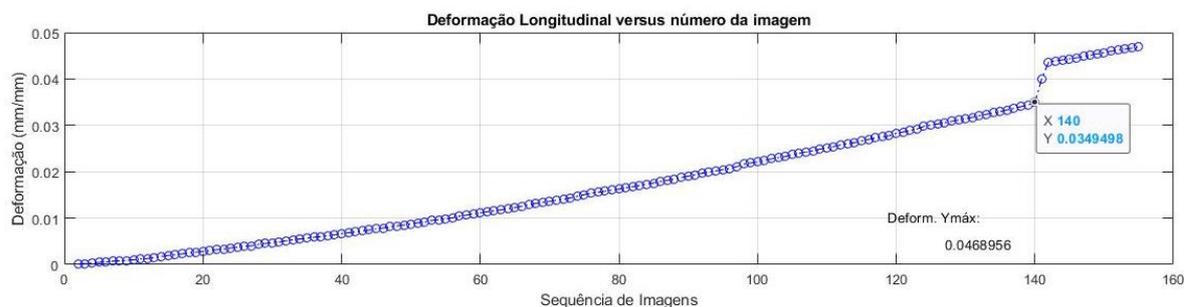
Figura 33 - Gráfico da deformação longitudinal gerado pelo *script I* do corpo de prova de alumínio (PB01)



Fonte: Próprio autor (2022)

Além do *script I* que gerou o gráfico da figura 33, foi desenvolvido o *script II* que possibilitou a geração do gráfico da figura 34. Neste *script* foi inserida rotina para corrigir eventuais acomodações laterais do corpo de prova durante o ensaio.

Figura 34 - Gráfico de deformação longitudinal gerado pelo *script II*, do Matlab, do corpo de prova de alumínio (PB01)



Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 34 demonstra o gráfico da deformação longitudinal do corpo de prova de alumínio (PB01) obtido através do *script II* do programa Matlab, foram utilizadas as mesmas imagens utilizadas no *script I*, a ruptura ocorreu na imagem número 140, conforme pode ser observado, neste caso, o valor da deformação obtido pelo *script* é igual a 0,0349498 (mm/mm).

Os dados de deformação longitudinal obtidos da máquina de tração e dos *scripts* I e II do Matlab, foram inseridos na tabela 2.

Tabela 2 - Dados comparativos da deformação longitudinal do corpo de prova de alumínio PB01 obtidos da máquina de tração e *scripts* I e II do Matlab

Dados Comparativos de Deformação					
C. de Prova	Deformação Longitudinal			Relação Percentual	
	M.Tração	Script 01	Script 02	Script 01 x M.Tração	Script 02 x M. Tração
PB01 (Alumínio)	0,03834796	0,0360651	0,0349498	-5,95%	-8,86%

Fonte: Próprio autor (2022)

As relações percentuais entre os resultados descritos na tabela 2, foram obtidas através da equação (10) abaixo:

$$\text{Rel}(\%) = \frac{(\text{DefSC} - \text{DefMT})}{\text{DefMT}} \times 100 \quad (10)$$

$$\text{Rel}(\%) = \frac{(\text{DefSC} - \text{DefEXT})}{\text{DefEXT}} \times 100 \quad (11)$$

Rel(%) – Relação percentual entre as deformações longitudinais estabelecidas pelo *script* do Matlab e pela Máquina de Tração;

Def_{SC} – Deformação longitudinal estabelecida pelo *script* em Matlab;

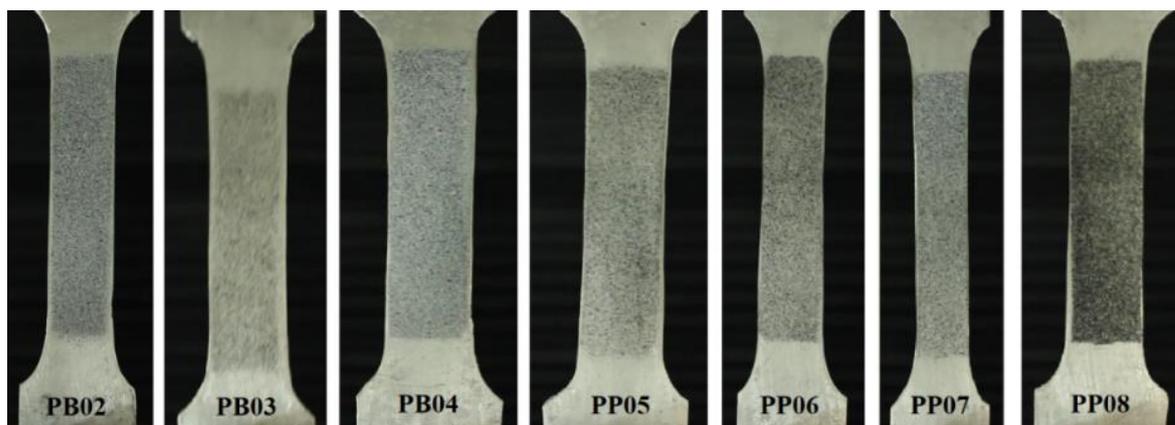
Def_{MT} - Deformação longitudinal estabelecida pela Máquina de Tração.

Def_{EXT} - Deformação longitudinal estabelecida pela Máquina de Tração.

A equação (11) deverá ser aplicada para os corpos de prova que utilizaram extensômetro.

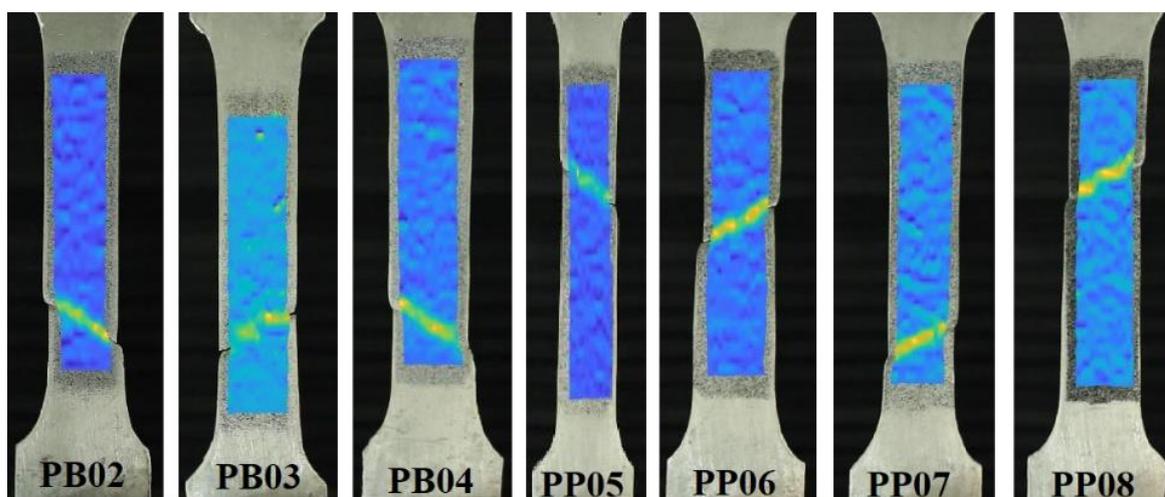
Ao todo foram utilizados 8 (oito) corpos de prova de alumínio, os mesmos procedimentos adotados para o corpo de prova PB-01, foram aplicados aos demais, a seguir serão demonstrados os resultados obtidos. A figura 35 demonstra os demais 07 (sete) corpos de prova de alumínio, sobre os quais foram aplicados os ensaios de tração e *scripts* para obtenção de dados de deformação, os resultados serão demonstrados a seguir.

Figura 35 - Corpos de prova de alumínio



Fonte: Próprio autor (2022)

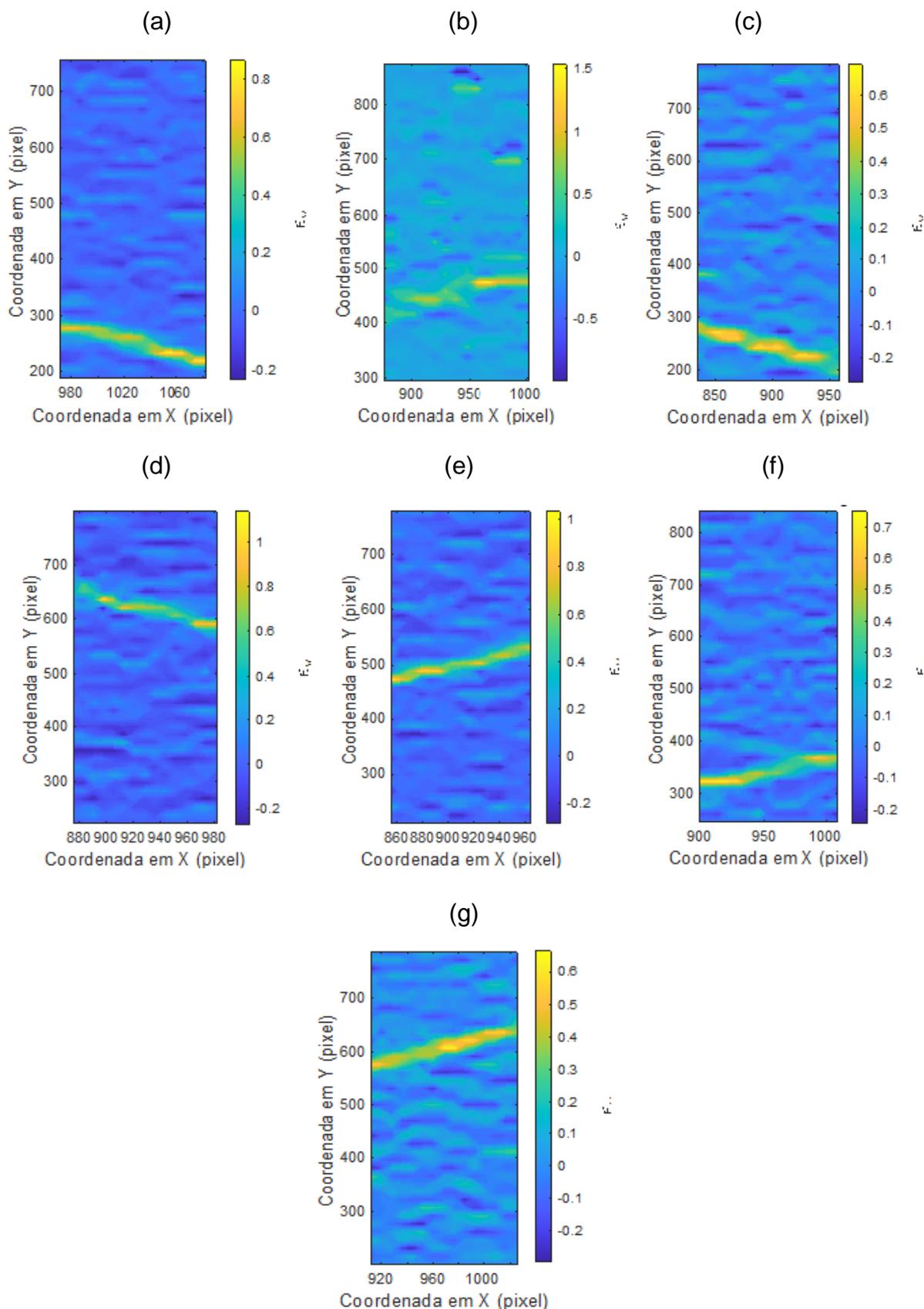
A figura 36 demonstra o resultado da aplicação do programa Matlab com a utilização das imagens obtidas através da filmagem do corpo de prova durante o ensaio de tração, o tom em amarelo da imagem, descreve os pontos de ruptura.

Figura 36 - Imagens dos corpos de prova de alumínio obtidas pelo *script I* do Matlab

Fonte: Próprio autor (2022)

As imagens contidas na figura 37 (a, b, c, d, e, f e g) demonstram os resultados da aplicação do *script I*, do programa Matlab com a utilização das imagens obtidas através da filmagem dos corpos de prova PB02, PB03, PB04, PP05, PP06, PP07 e PP08, durante o ensaio de tração, o tom em amarelo da imagem, descreve os pontos de ruptura, neste caso são demonstradas as coordenadas em pixel da imagem.

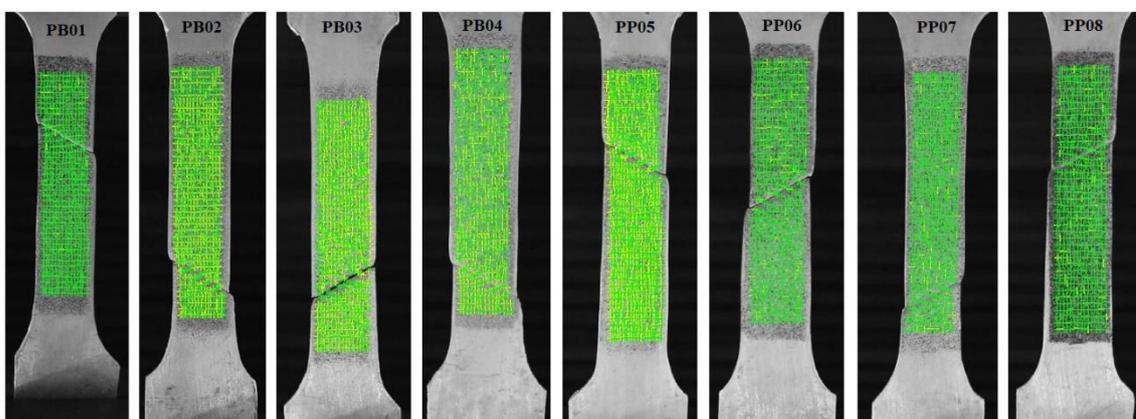
Figura 37 - Imagens obtidas dos corpos de prova de alumínio: a) PB02, b) PB03, c) PB04, d) PP05, e) PP06, f) PP07, g) PP08, obtidos pelo *script* I do Matlab em pixel



Fonte: Próprio autor (2022)

O programa Matlab realiza uma varredura ponto a ponto dentro da zona de interesse (ZOI) estabelecida pelo usuário, antes de iniciar este procedimento, deverá ser definido o *grid*, ou seja, a quantidade de linhas e colunas nas quais será feito o processamento da imagem para determinação da deformação longitudinal. A figura 38 demonstra o processamento da imagem dos corpos de prova de alumínio PB01, PB02, PB03, PB04, PP05, PP06, PP07 e PP08, estas imagens correspondem ao processamento do *script* no momento em que ocorre a ruptura dos corpos de prova.

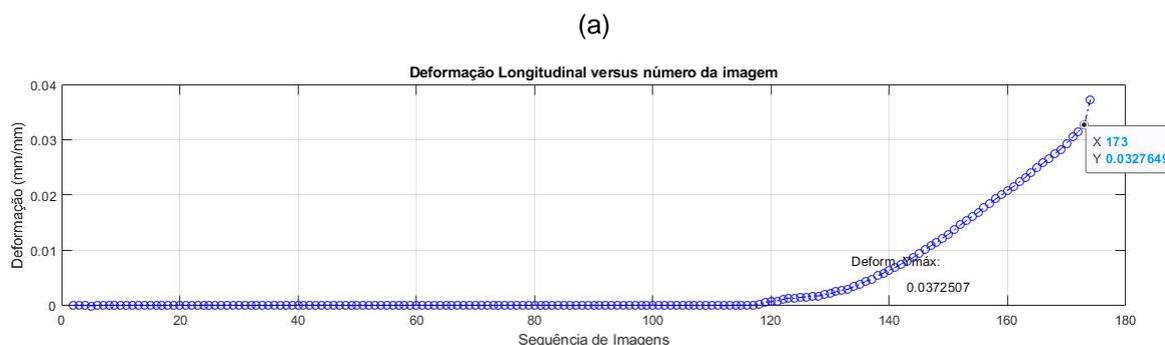
Figura 38 - Processamento de imagem dos corpos de prova de alumínio obtidas do *script* I do Matlab, no momento de ruptura



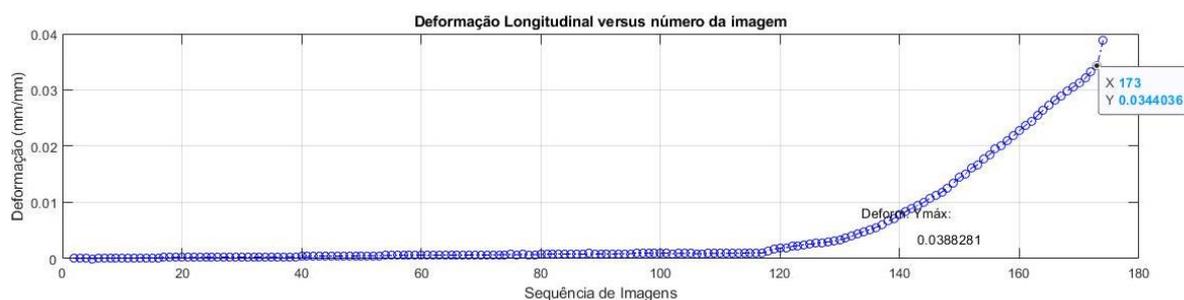
Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 39 demonstra os gráficos de deformação longitudinal do corpo de prova de alumínio PB02, sendo: a) Obtido através do *script* I do Matlab e b) Obtido através do *script* II do Matlab. As deformações são obtidas através da sequência de imagens, a filmagem foi convertida em 200 imagens, o valor X em cada figura demonstra o número da imagem em que ocorreu a ruptura e o valor de Y demonstra o valor da deformação.

Figura 39 - Gráficos obtidos da deformação do corpo de prova de alumínio (PB02) através do: (a) *Script* I do Matlab, (b) *Script* II do Matlab



(b)



Fonte: Próprio autor (2022)

Os gráficos da figura 39, item (a) e (b), demonstram em seu canto superior, representados pelas letras X e Y, que a ruptura do corpo de prova de alumínio PB02 ocorreu, respectivamente, na imagem de número 182, cujos valores de deformação resultaram em 0,0327649(mm/mm) e 0,0344036(mm/mm).

A tabela 3 descreve os valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação das deformações longitudinais, obtidos através do software do computador da máquina de tração e dos *scripts* I e II, do Matlab. O cálculo da relação percentual foi realizado utilizando-se equação (10) da página 66.

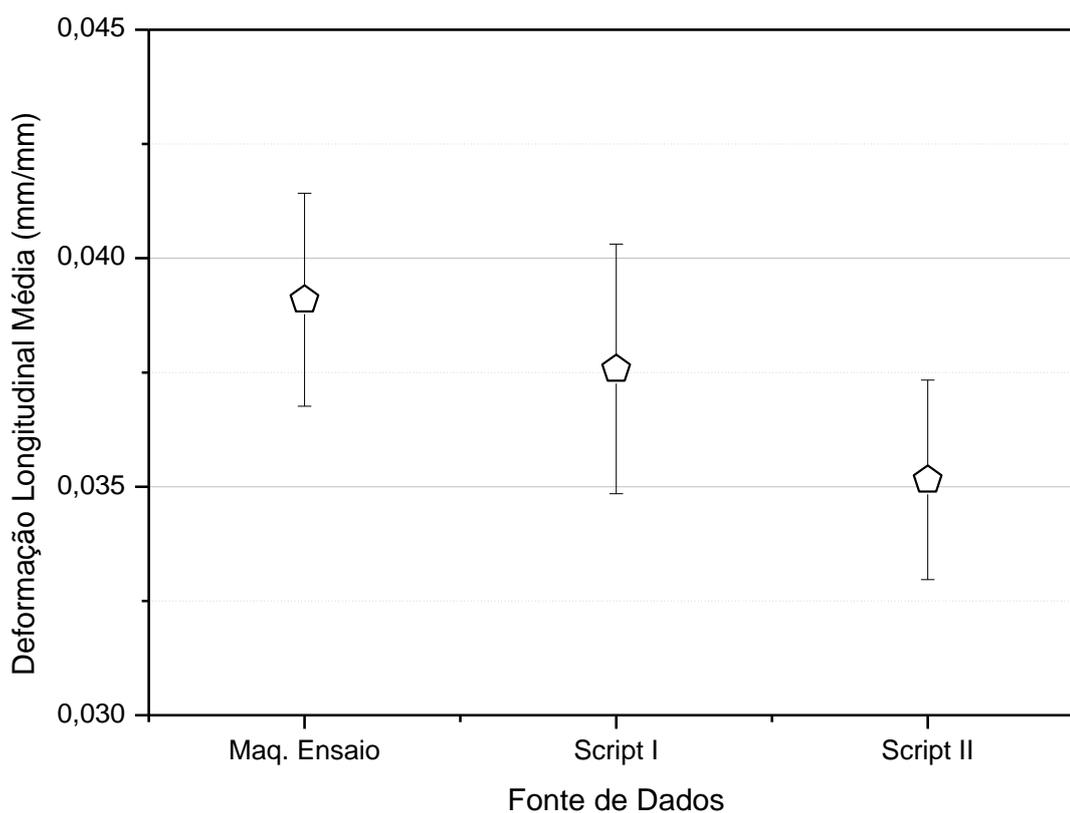
Tabela 3 – Valores da Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação e dados comparativos das deformações longitudinais (absolutas), dos corpos de prova de alumínio obtidos através dos dados da máquina de tração e *scripts* I e II do Matlab

Corpo de Prova	Máq. Tração	Script I	Script II	Relação Percentual	
Alumínio	Deformação Longitudinal	Deformação Longitudinal	Deformação Longitudinal	Rel. Perc. Script I x Máq. Tração	Rel. Perc. Script II x Máq. Tração
PB-01	0,0383480	0,0360651	0,0349498	-5,95%	-8,86%
PB-02	0,0356395	0,0327649	0,0344036	-8,07%	-3,47%
PB-03	0,0386468	0,0404647	0,0352711	4,70%	-8,73%
PB-04	0,0427701	0,0366468	0,0327287	-14,32%	-23,48%
PP-05	0,0420575	0,0399726	0,0390277	-4,96%	-7,20%
PP-06	0,0385319	0,0373227	0,0358174	-3,14%	-7,04%
PP-07	0,0392842	0,0408508	0,0368074	3,99%	-6,30%
PP-08	0,0374660	0,0365309	0,0321966	-2,50%	-14,06%
Média	0,039093	0,037577	0,03515	-3,78	-9,89
Desvio Padrão	0,00233	0,002732	0,002185	-	-
Coef. Variação	5,96	7,27	6,22	-	-

Fonte: Próprio autor (2022)

A tabela 3 demonstra que os valores obtidos através dos *scripts* I e II do Matlab apresentaram-se subestimados e superestimados em relação aos valores obtidos do software do computador da máquina de tração, cujas diferenças percentuais variaram de (-)23,48% a (+)4,70%.

Figura 40 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pela Máquina de Tração, *Script* I e *Script* II do Matlab dos Corpos de Prova de Alumínio



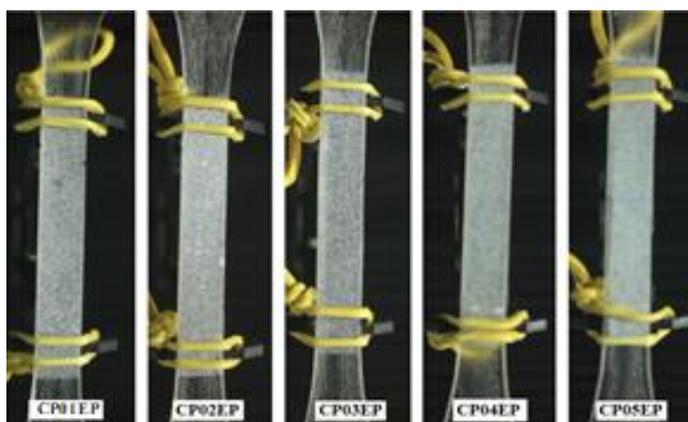
Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 40 demonstra o comparativo entre a média dos valores de deformação medidos pela Máquina de Tração, *Script* I e *Script* II dos corpos de prova de alumínio, descritos na tabela 3.

5.2 Polímero Epóxi

Foram confeccionados 05 (cinco) corpos de prova de polímero epóxi conforme demonstrado na figura 40, foi aplicada, através de *spray*, tinta branca, sobre a qual foi aplicado *spray* com tinta preta, formando grãos. A técnica DIC foi aplicada sobre esta área, utilizou-se também o extensômetro para realização de medições das deformações longitudinais.

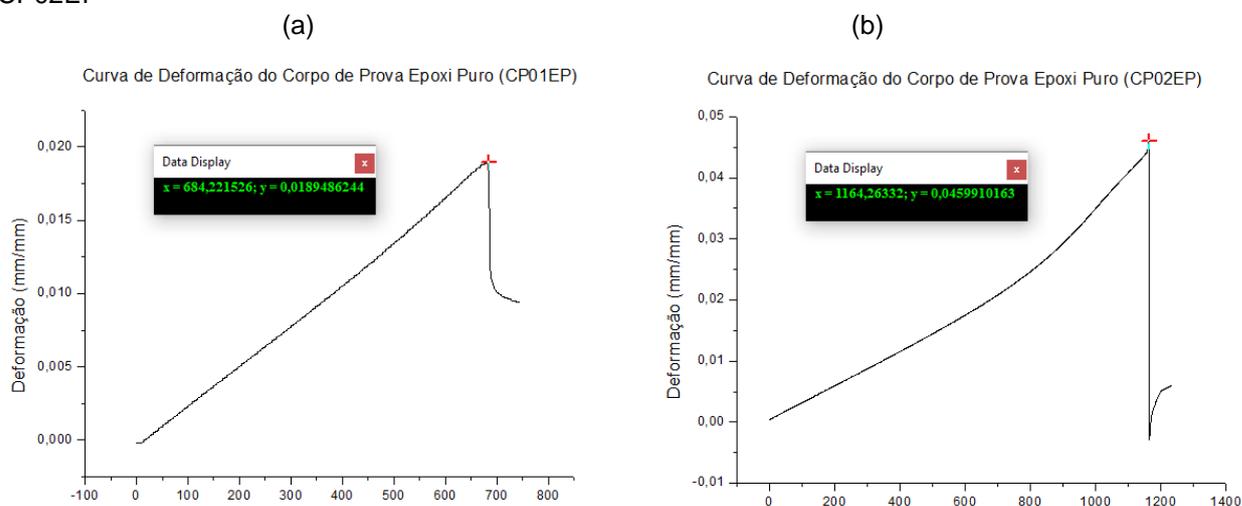
Figura 41 - Corpos de prova de polímero epóxi



Fonte: Próprio autor (2022)

Foram utilizados 05 corpos de prova de polímero epóxi: CP01EP, CP02EP, CP03EP, CP04EP, CP05EP, os gráficos demonstrados na figura 41 foram obtidos de acordo com os dados do extensômetro. Estes valores serão inseridos na tabela 04 (página 78), onde será feita a comparação com os dados obtidos dos *scripts* do Matlab.

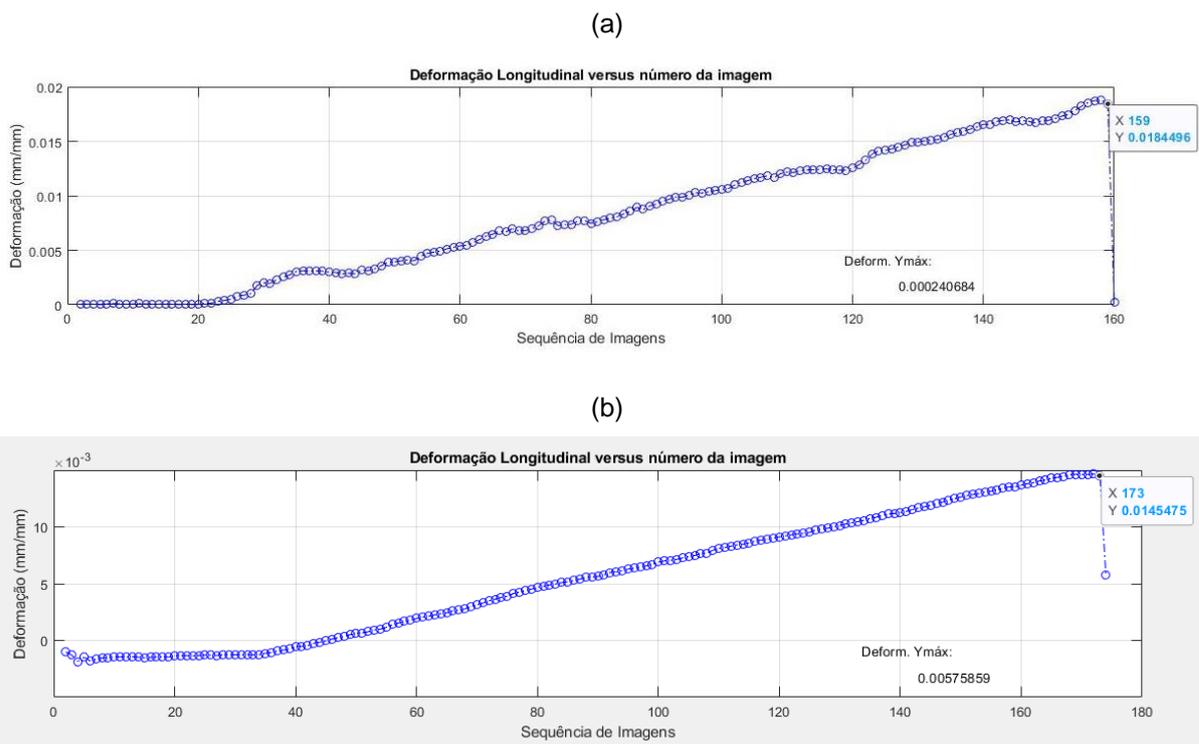
Figura 42 - Curva de deformação longitudinal dos corpos de prova de polímero epóxi: a) CP01EP, b) CP02EP



Fonte: Próprio autor (2022)

Foram aplicados os *scripts* I e II utilizando-se o Matlab nos 05 corpos de prova de polímero epóxi: CP01EP, CP02EP, CP03EP, CP04EP, CP05EP, os gráficos da figura 42, demonstram a deformação do corpo de prova CP01EP, sendo: a) Gráfico obtido através do *script* I do Matlab e b) Gráfico obtido através do *script* II do Matlab.

Figura 43 - Curva de Deformação Longitudinal do Corpo de Prova de Polímero Epóxi CPEP01, obtidos: a) Pelo *script* I do Matlab e b) Pelo *script* II do Matlab



Fonte: Próprio autor (2022)

Note-se que as curvas apresentam algumas diferenças. É importante salientar que as filmagens dos corpos de prova de polímero epóxi foram convertidas em 200 fotos e que os corpos de prova apresentaram ruptura na foto de número 173 (descritos no canto superior direito de cada figura), nos gráficos também são descritas as deformações registradas pelos *scripts* I e II, cujos valores resultaram, respectivamente, em 0,0184496(mm/mm) e 0,0145475(mm/mm).

A tabela 4 demonstra os dados de deformação longitudinal dos corpos de prova de polímero epóxi, denominados CP01EP, CP02EP, CP03EP, CP04EP e CP05EP. Estes valores foram obtidos através do extensômetro e dos *scripts* I e II do Matlab, a relação percentual entre os valores obtidos foi calculada pela equação (11), contida na página 71.

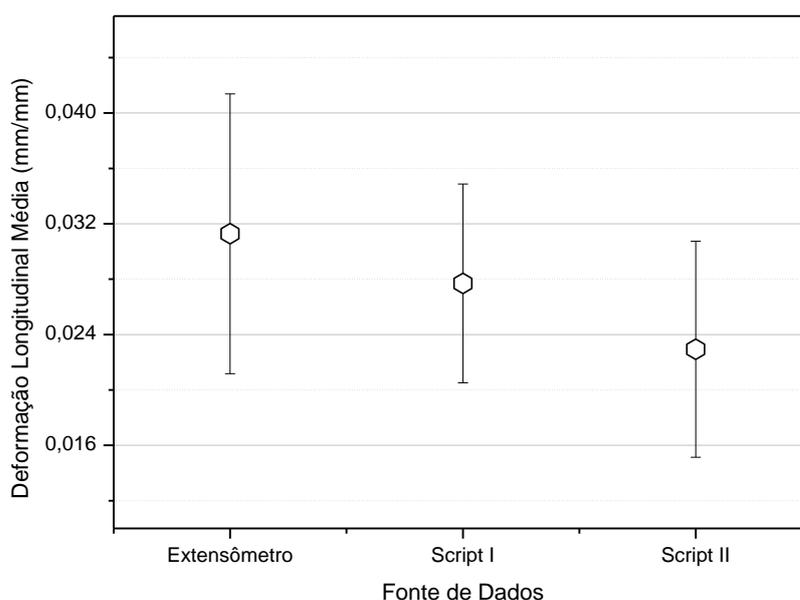
Tabela 4 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparativo das deformações longitudinais dos corpos de prova de polímero epóxi obtidos pelo extensômetro e *scripts* I e II do Matlab

Corpo de Prova	Deformação Longitudinal			Relação Percentual	
	Extensômetro	<i>Script</i> I	<i>Script</i> II	<i>Script</i> I x Extensômetro	<i>Script</i> II x Extensômetro
CP01EP	0,01890	0,0184496	0,0145475	-2,63%	-23,23%
CP02EP	0,04600	0,0371571	0,0202126	-19,21%	-56,05%
CP03EP	0,03100	0,0267594	0,0257174	-13,68%	-17,04%
CP04EP	0,02600	0,0241891	0,0192689	-6,96%	-25,89%
CP05EP	0,03450	0,0319195	0,0349441	-7,48%	1,29%
Média	0,03128	0,027695	0,022938	-9,95	-24,15
Desvio Padrão	0,010103	0,007177	0,007797	-	-
Coef. Variação	32,30	25,91	33,99	-	-

Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 44 demonstra o comparativo entre a média dos valores de deformação medidos pelo Extensômetro, *Script* I e *Script* II dos corpos de prova de polímero epóxi, descritos na tabela 4.

Figura 44 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, *Script* I e *Script* II do Matlab dos Corpos de Prova de Polímero Epóxi

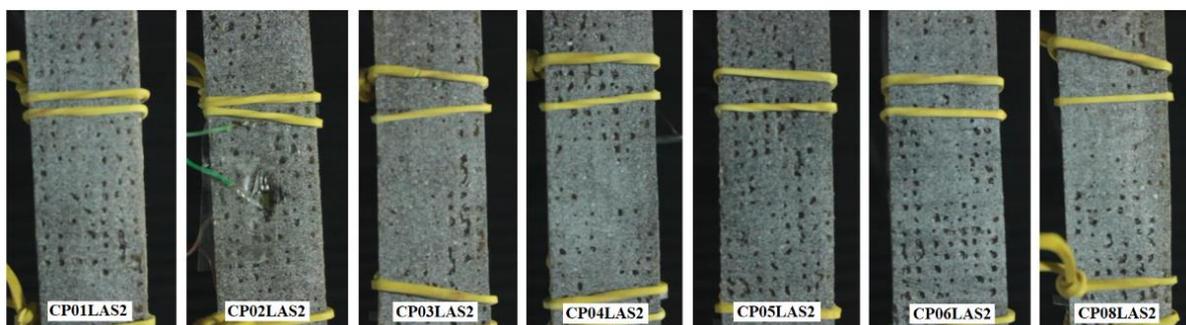


Fonte: Próprio autor (2022)

5.3 Compósito Epóxi com Tecido de Juta

Foram confeccionados corpos de prova de compósito epóxi com tecido de juta, conforme demonstrados na figura 43, foi aplicado através de *spray*, tinta branca, sobre a tinta branca foi aplicado *spray* com tinta preta, formando grãos. Os corpos de prova foram denominados CP01LAS2, CP02LAS2, CP03LAS2, CP04LAS2, CP05LAS2, CP06LAS2 e CP08LAS2.

Figura 45 - Corpos de prova de compósito epóxi com tecido de juta

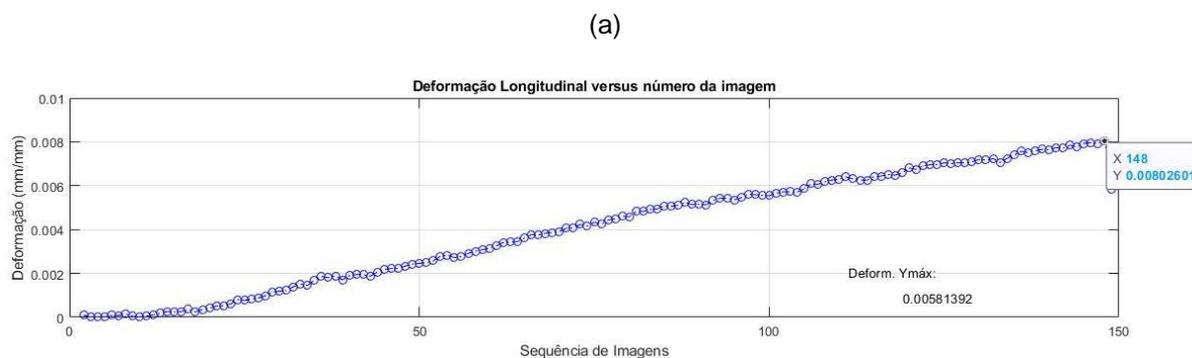


Fonte: Próprio autor (2022)

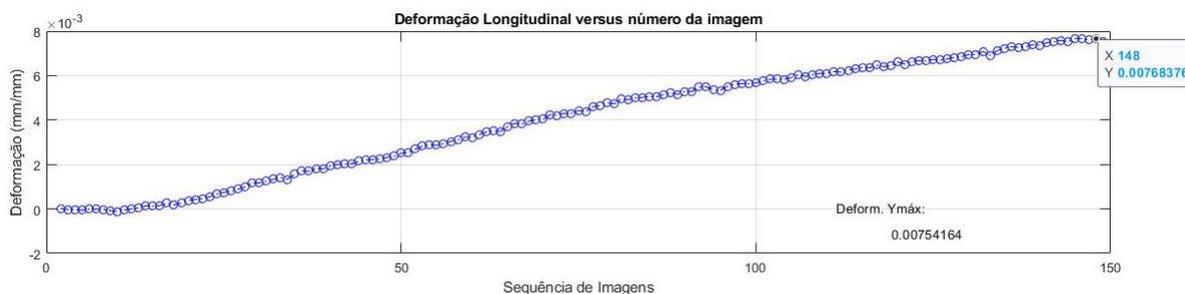
Foram aplicados os *scripts* I e II utilizando-se o Matlab nos 07 corpos de prova da compósito epóxi com tecido de juta: CP01LAS2, CP02LAS2, CP03LAS2, CP04LAS2, CP05LAS2, CP06LAS2 e CP08LAS2.

O gráfico demonstrado na figura 44 descreve a deformação longitudinal do corpo de prova CP01LAS2, sendo: a) Utilizando-se o *script* I do Matlab e b) Utilizando-se o *script* II do Matlab.

Figura 46 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova CP01LAS2, obtidos pelo: a) *Script* I do Matlab, b) *Script* II do Matlab



(b)



Fonte: Próprio autor (2022)

As filmagens dos corpos de prova do compósito epóxi com tecido de juta foram convertidas em 200 fotos e que os corpos de prova apresentaram ruptura na foto de número 148 (descritos no canto superior direito de cada figura), nos gráficos também são descritas as deformações registradas pelos *scripts* I e II, cujos valores resultaram, respectivamente, em 0,00802601(mm/mm) e 0,00768376(mm/mm).

A tabela 5 descreve os valores de deformação obtidos através do extensômetro, *strain gauge* e *scripts* I e II do Matlab, bem como a relação percentual entre estes valores, calculados através da equação (11).

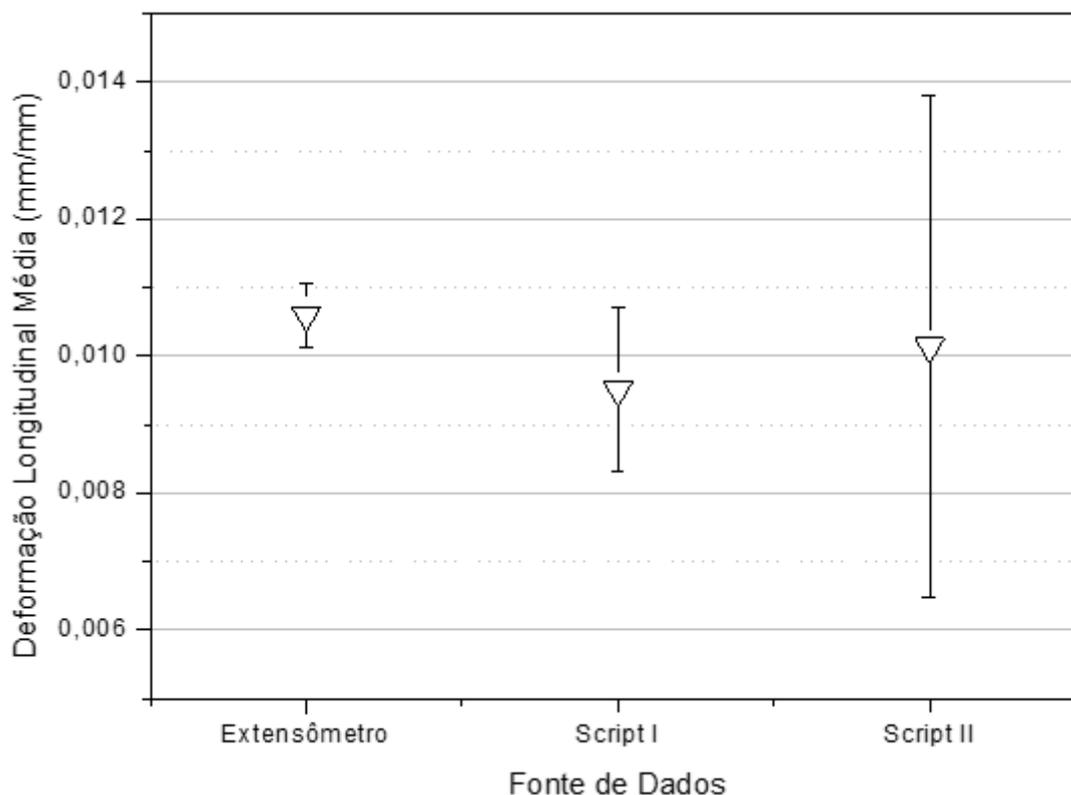
Tabela 5 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos dos valores de deformação longitudinal dos corpos de prova de compósito epóxi com tecido de juta

Corpo de Prova	Extensômetro	Script I	Script II	Relação Percentual	
Comp.Epóxi/ Tecido Juta	Deformação Longitudinal	Deformação Longitudinal	Deformação Longitudinal	Rel. Perc. Script I x Extensômetro	Rel. Perc. Script II x Extensômetro
CP01LAS2	0,01100	0,0080260	0,0076837	-27,04	-30,15
CP02LAS2	0,01060	0,0098982	0,0174000	-6,62	64,15
CP03LAS2	0,01030	0,0088812	0,0111591	-13,77	8,34
CP04LAS2	0,01050	0,0083709	0,0078621	-20,28	-25,12
CP05LAS2	0,01140	0,010055	0,0063219	-11,80	-44,54
CP06LAS2	0,01040	0,0115248	0,0096493	10,82	-7,22
CP08LAS2	0,01000	0,0098160	0,0108729	-1,84	8,73
Média	0,0106	0,00951	0,010136	-10,08	-3,69
Desvio Padrão	0,000465	0,00119	0,003659	-	-
Coef. Variação	4,39	12,51	36,10	-	-

Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 47 demonstra o comparativo entre a média dos valores de deformação medidos pelo Extensômetro, *Script I* e *Script II* do Matlab dos corpos de prova de compósito epóxi com tecido de juta, de acordo com os valores descritos na tabela 5.

Figura 47 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, *Script I* e *Script II* do Matlab dos corpos de prova de compósito epóxi com tecido de juta



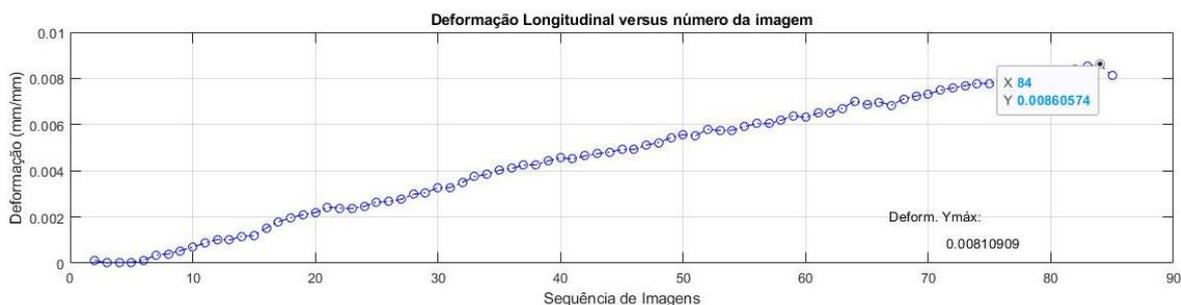
Fonte: Próprio autor (2002)

5.4 Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional de Juta

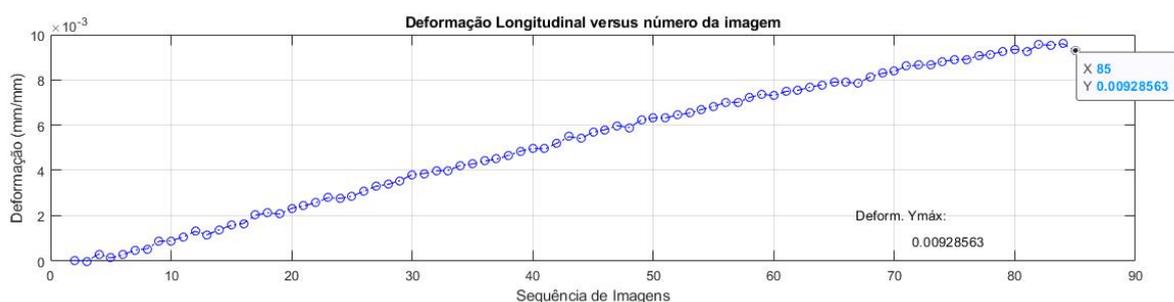
Foram confeccionados corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de juta, denominados: CP02J0 e CP04J0, foi aplicada, através de *spray*, tinta branca sobre o corpo de prova e sobre a tinta branca foi aplicado *spray* com tinta preta, formando grãos. A figura 46 demonstra os gráficos descritos a partir da deformação dos corpos de prova registrada através dos *scripts* I e II do Matlab.

Figura 48 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de juta CP02J0, obtidos pelos: a) *script I* do Matlab e b) *script II* do Matlab

(a)



(b)



Fonte: Próprio autor (2022)

A tabela 6 demonstra os dados de deformação longitudinal dos corpos de prova do compósito poliéster com fibra unidirecional de juta, denominados CP02J0, CP04J0. Estes valores foram obtidos através do extensômetro, também foram utilizados os *scripts I* e *II* do Matlab, a relação percentual entre os valores obtidos foi calculada pela equação (11), contida na página 71.

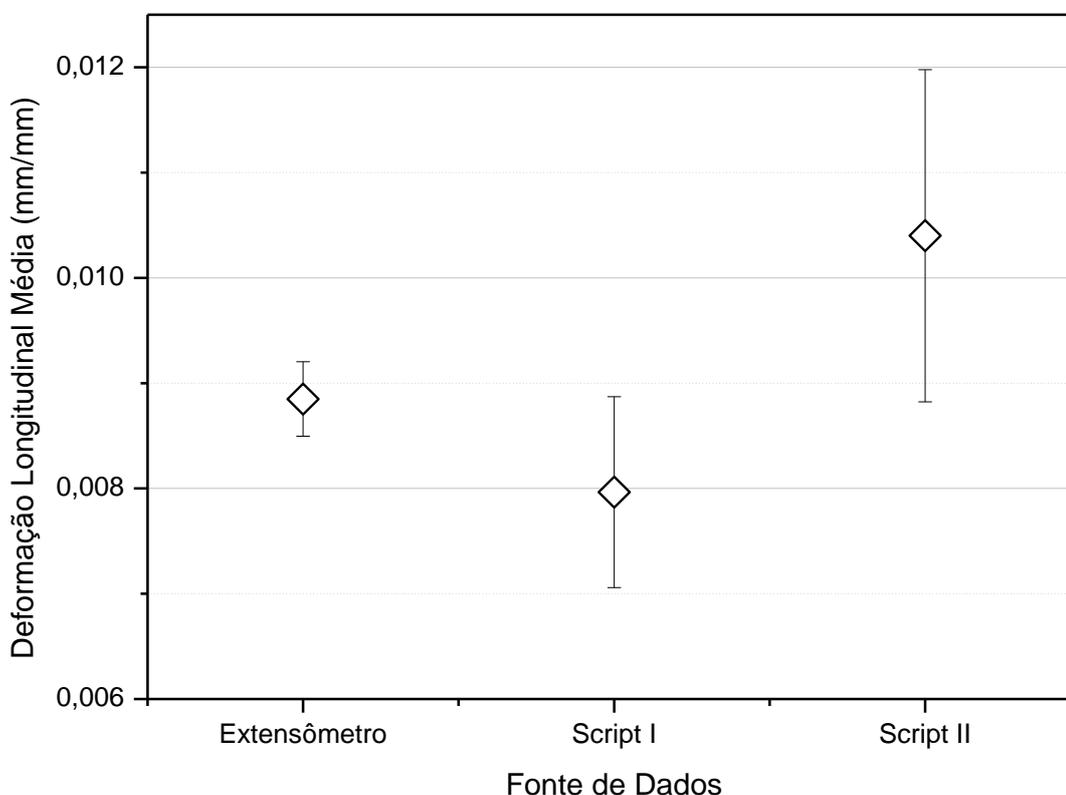
Tabela 6 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos dos valores de deformação longitudinal dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de juta

Corpo de Prova	Deformação Longitudinal			Relação Percentual	
	Extensômetro	<i>Script I</i>	<i>Script II</i>	<i>Script I</i> x Extensômetro	<i>Script II</i> x Extensômetro
Comp. Poliéster/Fibra Unid. Juta					
CP02J0	0,00860	0,00860574	0,00928563	0,07%	7,97%
CP04J0	0,00910	0,0073241	0,01151730	-19,52%	26,56%
Média	0,00885	0,007965	0,010401	-9,72	17,27
Desvio Padrão	0,000354	0,000906	0,001578	-	-
Coef. Variação	3,99	11,38	15,17	-	-

Fonte: Próprio autor (2022)

Observa-se pela tabela 6 que ocorreram valores de deformação longitudinal obtidos pelos *scripts* I e II do Matlab, que variaram entre (-)19,52% e (+)7,97%. É importante salientar que, dentre todos os ensaios realizados, a deformação longitudinal do corpo de prova de poliéster com fibra unidirecional de juta CP02J0, obtida através do *script* I do Matlab, apresentou o valor percentual comparativo igual a (+)0,07%, que foi o mais próximo em relação às técnicas de extensometria tradicionais (extensômetro mecânico).

Figura 49 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, *Script* I e *Script* II do Matlab dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de juta



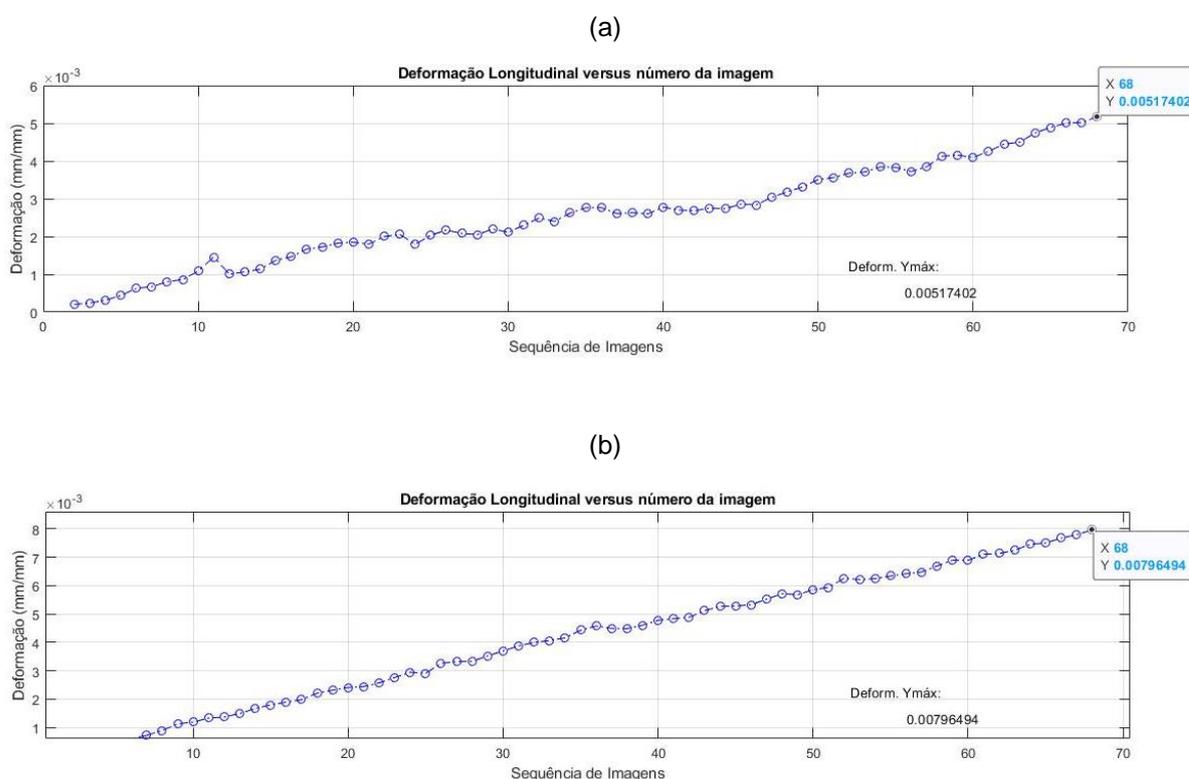
Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 49 demonstra o comparativo entre a média dos valores de deformação medidos pelo Extensômetro, *Script* I e *Script* II do Matlab dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de juta, de acordo com os valores descritos na tabela 6.

5.5 Compósito Poliéster com Fibra Unidirecional de Malva

Foram confeccionados corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de malva denominados CP01M0, CP02M0 e CP07M0, foi aplicada, através de spray, tinta branca sobre o corpo de prova e sobre a tinta branca foi aplicado *spray* com tinta preta, formando grãos. A figura 47 demonstra os gráficos descritos a partir da deformação do corpo de prova registrada através dos *scripts* I e II do Matlab.

Figura 50 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de malva CP01M0, obtidas pelo: a) *script* I do Matlab, b) *script* II do Matlab



Fonte: Próprio autor (2022)

A tabela 7 demonstra os dados de deformação longitudinal dos corpos de prova do compósito poliéster com fibra unidirecional de malva, denominados CP01M0, CP02M0 e CP07M0. Estes valores foram obtidos através do extensômetro, também foram utilizados os *scripts* I e II do Matlab, a relação percentual entre os valores obtidos foi calculada pela equação (11), contida na página 71.

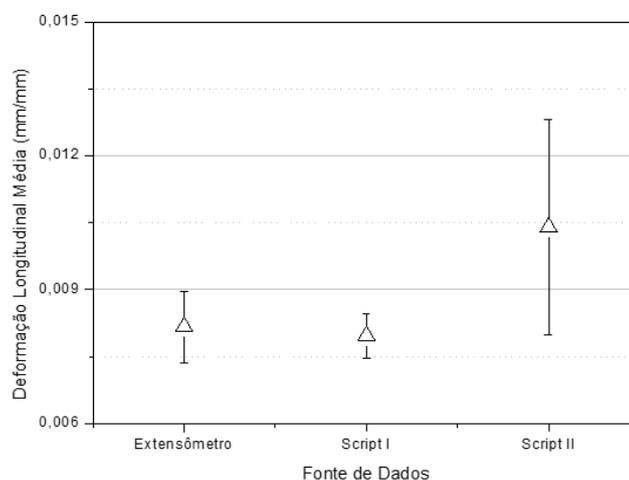
Tabela 7 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos dos valores de deformação longitudinal dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de malva

Corpo de Prova	Deformação Longitudinal			Relação Percentual	
	Extensômetro	Script I	Script II	Script I x Extensômetro	Script II x Extensômetro
Compósito Poliéster/Fibra Unid. Malva					
CP01M0	0,00740	0,00517402	0,00796494	-30,08%	7,63%
CP02M0	0,00810	0,00599885	0,01266480	-25,94%	56,36%
CP07M0	0,00900	0,00606496	0,01124670	-32,80%	24,61%
Média	0,008167	0,007965	0,010401	-29,54	29,65
Desvio Padrão	0,000802	0,000496	0,002411	-	-
Coef. Variação	9,82	11,38	15,17	-	-

Fonte: Próprio autor (2022)

Observa-se pela tabela 7 que ocorreram variações negativas e positivas nos valores de deformação obtidos pelos *scripts* I e II, demonstrando que os *scripts* apresentaram valores abaixo e acima em relação aos valores do extensômetro, dentre os quais ocorreram diferenças que variaram entre (-)32,80% e (+)56,36%. Um fato que merece destaque são os baixos valores de deformação apresentados pelos corpos de prova de compósitos poliéster com fibra unidirecional de malva, que variaram entre 0,0074 e 0,0090 (mm/mm), valores estes medidos pelo extensômetro mecânico.

Figura 51 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, *Script* I e *Script* II do Matlab dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de malva



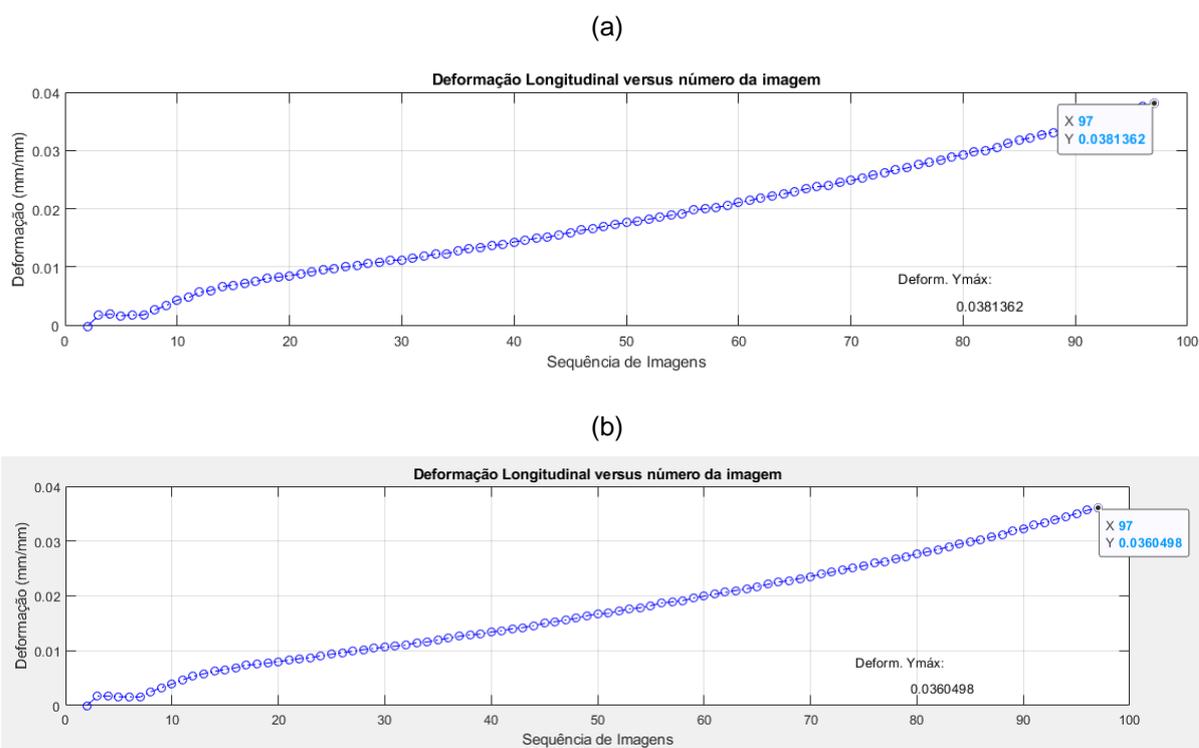
Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 51 demonstra o comparativo entre a média dos valores de deformação medidos pelo Extensômetro, *Script I* e *Script II* dos corpos de prova de compósito poliéster com fibra unidirecional de malva, de acordo com os valores descritos na tabela 7.

5.6 Polímero Poliéster

Foram confeccionados corpos de prova de polímero poliéster, sobre os quais foi aplicada, através de *spray*, tinta branca e sobre a tinta branca foi aplicado *spray* com tinta preta, formando grãos. A figura 48 demonstra os gráficos descritos a partir da deformação dos corpos de prova registrada através dos *scripts I* e *II* do Matlab.

Figura 52 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova de polímero poliéster, obtidos pelo: a) *Script I* do Matlab, b) *Script II* do Matlab



Fonte: Próprio autor (2022)

A tabela 8 demonstra os dados de deformação longitudinal dos corpos de prova do polímero poliéster, denominados CP01MP, CP02MP, CP03MP, CP06MP e CP08MP. Estes valores foram obtidos através do extensômetro, também foram utilizados os *scripts I* e *II* do Matlab, a relação percentual entre os valores obtidos foi calculada pela equação (11), contida na página 71.

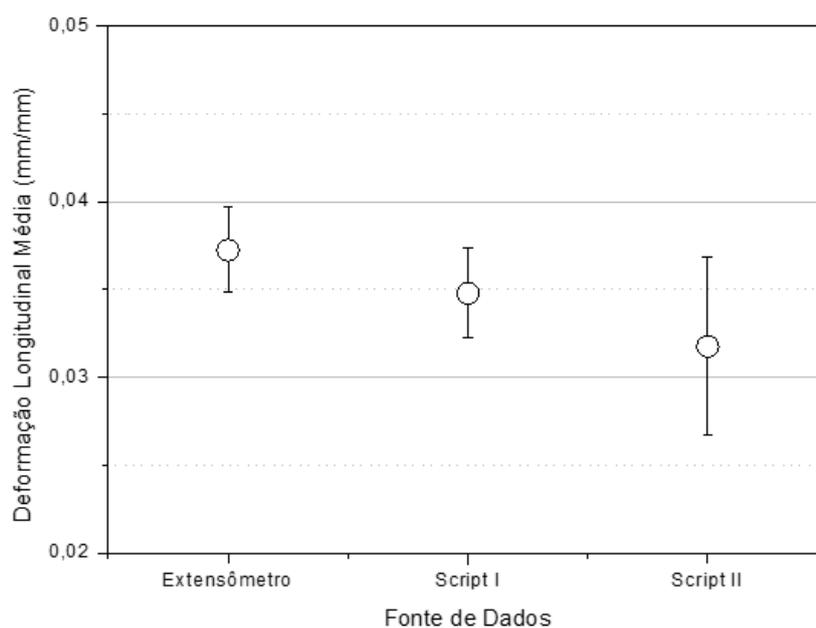
Tabela 8 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos de deformação longitudinal dos corpos de prova de polímero poliéster

Corpo de Prova	Deformação Longitudinal			Relação Percentual	
	Extensômetro	Script I	Script II	Script I x Extensômetro	Script II x Extensômetro
Polímero Poliéster					
CP01MP	0,036093487	0,0381362	0,0360498	5,66%	-0,12%
CP02MP	0,033492420	0,0348926	0,0323898	4,18%	-3,29%
CP03MP	0,038767546	0,0352594	0,0371240	-9,05%	-4,24%
CP06MP	0,038733850	0,030953	0,0254034	-20,10%	-34,42%
CP08MP	0,039125400	0,0346561	0,0278578	-11,42%	-28,80%
Média	0,037243	0,034779	0,031765	-6,14	-14,17
Desvio Padrão	0,002423	0,002558	0,005079	-	-
Coef. Variação	6,51	7,35	15,99	-	-

Fonte: Próprio autor (2022)

Observa-se pela tabela 8 que a maioria das variações dos valores de deformação obtidos pelos *scripts* I e II foram negativas, demonstrando que os *scripts* apresentaram valores, em sua maioria, abaixo dos valores obtidos pelo extensômetro, dentre os quais ocorreram diferenças que variaram entre (-)34,42% e (+)5,66%.

Figura 53 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, *Script* I e *Script* II do Matlab dos corpos de prova de polímero poliéster



Fonte: Próprio autor (20220)

A figura 53 demonstra o comparativo entre a média dos valores de deformação longitudinal medidos pelo Extensômetro, *Script I* e *Script II* do Matlab dos corpos de prova de polímero poleéster, de acordo com os valores descritos na tabela 8.

5.7 Compósito Poliéster com Lama Vermelha

Foram confeccionados 08 corpos de prova, denominados CP01LV, CP02LV, CP03LV, CP04LV, CP05LV, CP06LV, CP07LV e CP08LV, utilizando-se resina poliéster com lama vermelha, sobre os quais foi aplicada inicialmente *spray* na cor branca e posteriormente *spray* na cor preta, formando-se textura com grãos a fim de aplicar-se sobre esta área a técnica DIC.

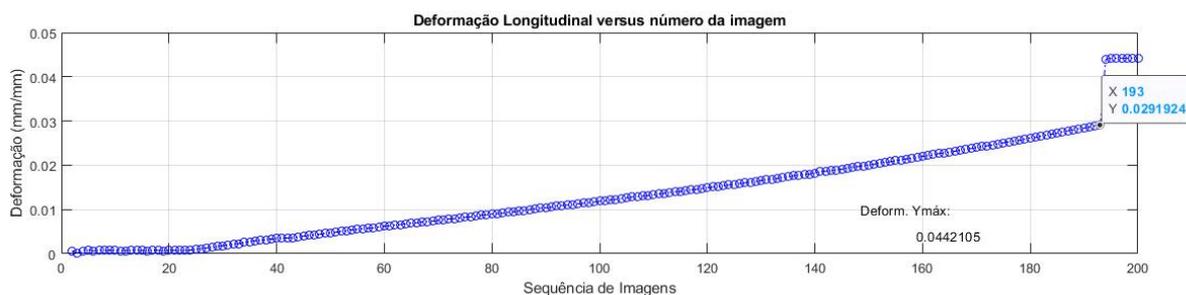
Os 08 corpos de prova de Poliéster com Lama Vermelha foram submetidos a ensaios de tração com filmagem da zona de interesse e obtenção de dados de deformação longitudinal através de extensômetro mecânico.

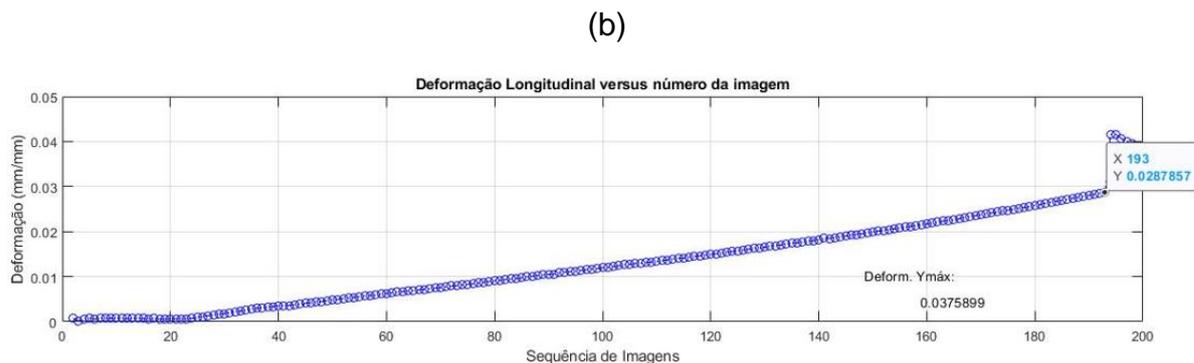
Após a filmagem dos corpos de prova, foram confeccionadas 200 imagens digitais de cada corpo de prova de Poliéster com Lama Vermelha, os quais foram submetidos aos *scripts* de correlação digital de imagem do Matlab

Os gráficos da figura 49 demonstram a deformação longitudinal do corpo de prova CP01LV, obtidos através dos *scripts* I e II do Matlab.

Figura 549 - Curvas de deformação longitudinal do corpo de prova CP01LV de Compósito Poliéster com Lama Vermelha, obtidos pelo: a) *Script I* do Matlab, b) *Script II* do Matlab

(a)





Fonte: Próprio Autor (2022)

A tabela 11 demonstra os valores de deformação longitudinal dos 08 corpos de prova de Compósito Poliéster com Lama Vermelha obtidos pelo extensômetro mecânico e pelos *scripts* I e II, do Matlab, também são demonstrados comparativos percentuais entre estes valores.

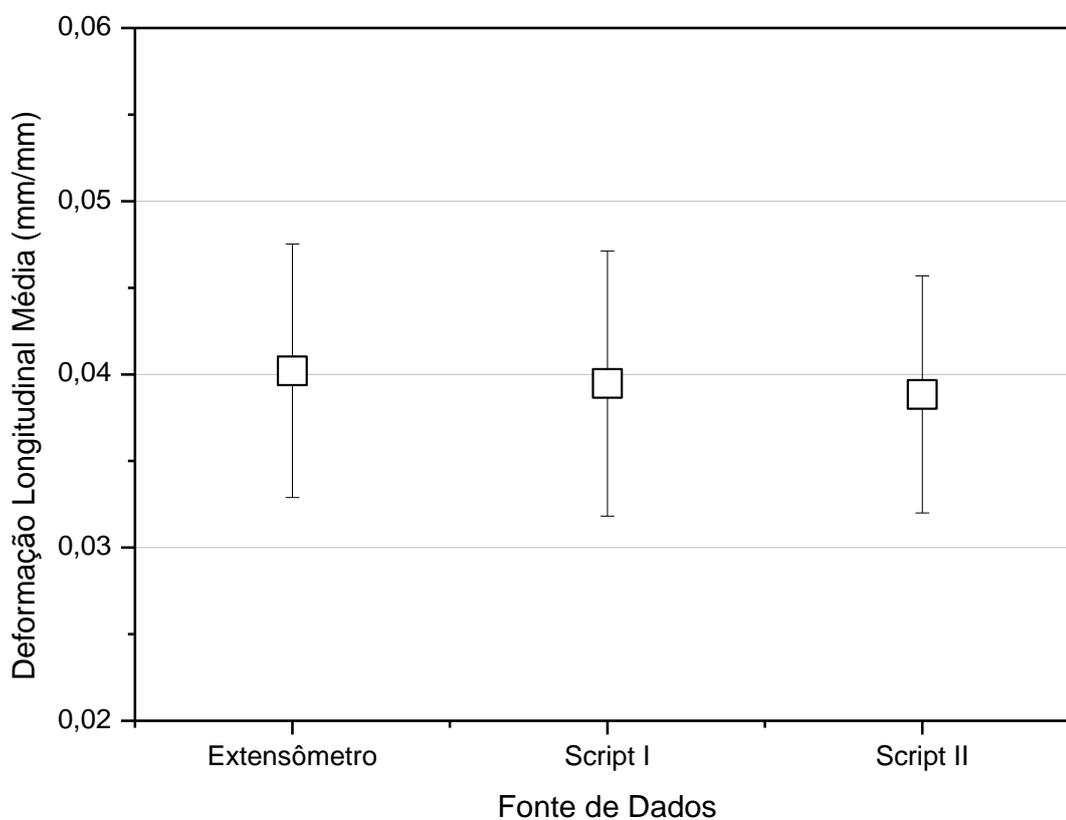
Tabela 9 – Valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e dados comparativos dos valores de deformação longitudinal dos corpos de prova de compósito poliéster com lama vermelha

Corpos de Prova	Deformação Longitudinal			Relação Percentual	
	Extensômetro	Script I	Script II	Script I x Extensômetro	Script II x Extensômetro
Comp.Poliéster Lama Vermelha					
CP01LV20	0,02966591	0,02919240	0,02878570	-1,60%	-2,97%
CP02LV20	0,03644581	0,03337290	0,03333610	-8,43%	-8,53%
CP03LV20	0,04122122	0,03909040	0,03816940	-5,17%	-7,40%
CP04LV20	0,03751122	0,03915160	0,04038890	4,37%	7,67%
CP05LV20	0,04352470	0,04498890	0,04260070	3,36%	-2,12%
CP06LV20	0,04642055	0,04361240	0,04377970	-6,05%	-5,69%
CP07LV20	0,05266142	0,05296450	0,05011150	0,58%	-4,84%
CP08LV20	0,03419427	0,03339380	0,03356740	-2,34%	-1,83%
Média	0,040206	0,039471	0,038842	-1,91	-3,21
Desvio Padrão	0,007314	0,00765	0,006841	-	-
Coef. Variação	18,19	19,38	17,61	-	-

Fonte: Próprio autor (2022)

Observa-se pela tabela 9 que a maioria das variações dos valores de deformação obtidos pelos *scripts* I e II foram negativas, demonstrando que os *scripts* apresentaram valores, em sua maioria, abaixo dos valores obtidos pelo extensômetro, dentre os quais ocorreram diferenças que variaram entre (-)8,53% e (+)7,67%.

Figura 55 - Comparativo da Média dos Valores de Deformação Longitudinal medidos pelo Extensômetro, *Script* I e *Script* II dos corpos de prova de compósito poliéster com lama vermelha

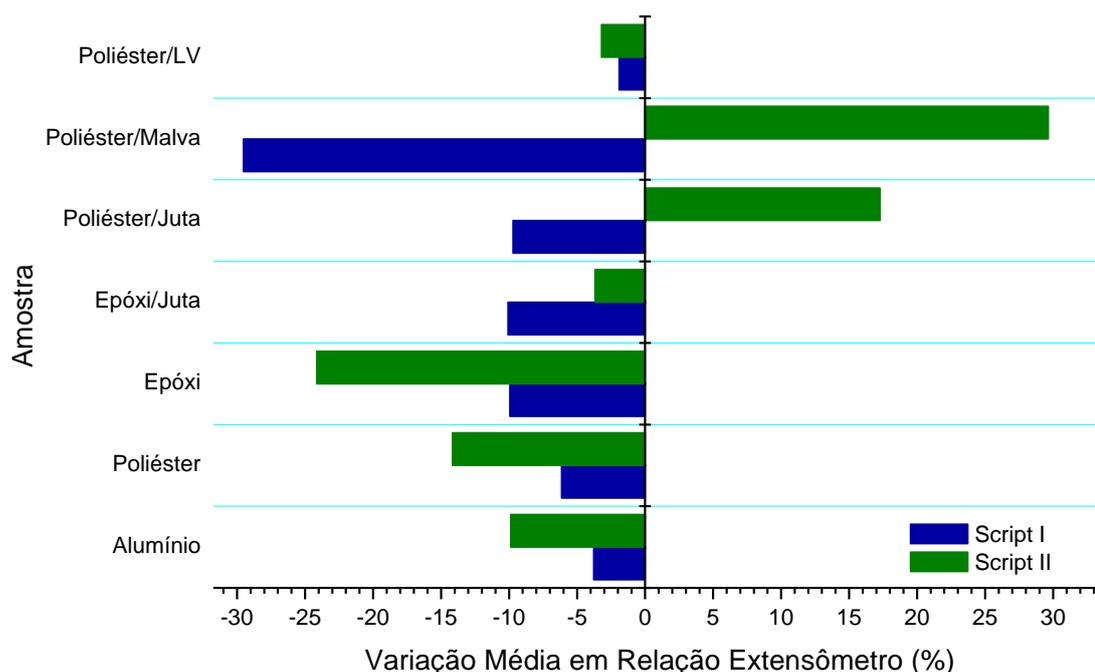


Fonte: Próprio autor (2022)

5.8 Comparativo das Séries Testadas

O gráfico da figura 56 demonstra a variação média entre os valores de deformação longitudinal obtidos dos *scripts* I e II e os valores medidos através do extensômetro e máquina de tração, este último caso, ocorreu unicamente com o alumínio. Conforme pode ser observado, as maiores variações ocorreram nas medições realizadas nos compósitos de poliéster com fibras de juta e malva. A menor variação ocorreu no polímero poliéster com lama vermelha. Entretanto, pode ser verificado através das tabelas com os valores das medições, que os resultados com menor variação em relação ao extensômetro e máquina de tração ocorreram através do *script* I.

Figura 56 – Gráfico com a variação média dos valores de deformação longitudinal obtidos dos *Scripts* I e II das amostras em relação ao extensômetro



Fonte: Próprio autor (2022)

6 CONCLUSÃO

Este trabalho visou demonstrar a viabilidade da construção de algoritmos para análise e cálculo de deslocamento e deformações pelo uso da técnica de Correlação Digital de Imagem (DIC).

Os algoritmos utilizados viabilizaram a confecção de gráficos cujos resultados demonstraram valores coerentes e precisos quando comparados com os valores obtidos por outras técnicas extensometria.

Os valores médios de deformação calculados pelos algoritmos desenvolvidos através dos *scripts* I e II do Matlab, demonstraram uma boa precisão e sua certificação caracterizada pela comparação com os dados obtidos pela extensometria tradicional comprovaram a eficácia do método DIC utilizado neste trabalho.

É importante salientar que através do método DIC, verificou-se que os valores comparativos de deformação longitudinal dos corpos de prova de polímero epóxi, compósito epóxi com tecido de juta, compósito poliéster com fibra unidirecional de juta, polímero poliéster e compósito poliéster com lama vermelha, apresentaram valores, respectivamente, iguais a (+)1,29%, (-)1,84%, (+)0,07%, (-)0,12% e (+)0,58%. Os valores negativos referem-se a valores subestimados e os valores positivos a valores superestimados.

A interação dos algoritmos com o usuário apresentou-se de forma acessível e de fácil entendimento tanto nos procedimentos de inserção de dados quanto em relação à demonstração dos resultados de forma clara e didática.

Conforme constatado através dos valores de deformação demonstrados no quarto parágrafo deste item, a técnica DIC apresentou valores precisos. Entretanto, constatou-se valores bastante distintos em relação à extensometria tradicional, por exemplo, os valores obtidos nos ensaios realizados nos corpos de prova de caulim atingiram valor subestimados e superestimados, respectivamente, iguais a (-)56,05% e (+)63,38.

Constatou-se que as diferenças significativas apresentadas pelos percentuais comparativos entre a DIC e os métodos de extensometria tradicionais foram decorrentes, principalmente, pela baixa resolução das imagens obtidas pela câmera fotográfica utilizada.

REFERÊNCIAS

- AFFONSO, E. A. **Extensometria Óptica por Moiré Geométrico Digital para análise de Tensões no Plano**. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.
- AKOLKAR, H.; IENG, S. H.; BENOSMAN, R. **Real-time high speed motion prediction using fast aperture-robust event-driven visual flow**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, p. 1–12, 2020.
- ANDERSON, J.; CHU, T. C.; PETERS, W. H.; RANSON W. F.; SUTTON, M. A. **Application of digital correlation methods to rigid body mechanics**. Optical Engineering. v. 22, n. 6, 1984.
- ANGEL, O.; ROTHWELL, G.; ENGLISH, R.; REN, J. CUMMINGS, A. **Effect of Post Processing of Digital Image Correlation on Obtaining Accurate True Stress-Strain Data for AISI 304L**. ScienceDirect. Nuclear Engineering and Technology. Korean Nuclear Society. Elsevier Korea LLC, 2022.
- ASARO, R. J.; LUBARDA, V. A. **Mechanics of Solids and Materials**. New York: Cambridge University Press, 2006.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MARUZEK. D. F. **Mechanics of Materials**. 8th. edition. McGraw-Hill Education. New York, 2020.
- BELEZA, S. C. A. **Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2017.
- BENCHIMOL, S. **Amazônia - A Guerra na Floresta**. 2a. Edição, Editora 247 S.A. Edição do Kindle, 2013.
- BORNERT, M.; BRÉMAND, F.; DOUMALIN, P.; DUPRÉ, J. -C.; FAZZINI, M.; GRÉDIAC, M.; HILD, F.; MISTOU, S.; MOLIMARD, J.; ORTEU, J. -J.; ROBERT, L.; SURREL, Y.; VACHER, P.; WATTRISSE, B. **Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors: Methodology and Results**. Experimental Mechanics, v. 49, n. 3, p. 353–370, 2009.
- BOUKHTACHE, S.; ABDELOUAHAB, K.; BERRY, F; BLAYSAT, B.; GRÉDIAC, M.; SUR, F. **When Deep Learning Meets Digital Image Correlation**. Optics and Lasers in Engineering, v. 136, n. April 2020, p. 106308, 2021.
- BRAGA, F. O.; GOMES, V. A.; MARGEM, J. I.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S. N.; RIBEIRO, C. G. D. **Flexural Behavior of Epoxy Matrix Composites Reinforced with Malva Fiber**. Materials Research, p. 114-120, 2015.

- BRECKON, T.; SOLOMON, C. **Fundamental of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab**. 1st Edition, Wiley-Blackwell, 2011.
- BURGE, M. J.; BURGER, W.; **Principles of Image Processing – Fundamental Techniques**. Springer, 2009.
- CAMARGO, S. B.; CRUZ, D. E. **Ensaio de Acelerômetria e Extensometria de Elevador Cremalheira**. Universidade de Taubaté. São Paulo, 2016.
- CARDOSO, J. G. R.; CARVALHO, P. S. L.; FONSECA, P. S. M.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R. **A Indústria do Alumínio: Estrutura e Tendências**. BNDES – Biblioteca Digital, p. 43 – 48, 2011.
- CHEN, B.; PAN, B. **Camera calibration using synthetic random speckle pattern and digital image correlation**. Optics and Lasers in Engineering, v. 126, n. July 2019, p. 105919, 2020.
- CHEN, C. H.; QIDWAY, U. **Digital Image Processing – An Algorithmic Approach with Matlab**. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2009.
- CHU, T. C.; RANSON, W.F.; SUTTON, M. A.; PETERS, W.H. **Applications of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics**, v. 25, p. 232–244, 1985.
- CUNHA, E. J. S. **Influência do Uso de Resíduo do Processo Bayer nas Propriedades Térmicas e Mecânicas de Compósitos de Base Polimérica Reforçados com Fibra de Curauá**. Tese (Doutorado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Pará. Belém, 2015.
- DALLY, J. W.; SHUKLA, A. **Experimental Solid Mechanics**. Second Edition, College House Enterprises, LLC, 2010.
- DONG, Y. L.; PAN, B. **A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation**. Society for Experimental Mechanics, v. 57, p. 1161–1181, 2017.
- EDDINS, S. L.; GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing Using Matlab. Second Edition**. Gatesmark, LLC, 2009.
- GAO, W.; HUANG, Q.; ZHAO, F. **Image matching by normalized cross-correlation**. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, p. 729–732, 2006.
- HADDADI, H.; BELHABIB, S. **Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique**. Optics and Lasers in Engineering, v. 46, n. 2, p. 185–196, 2008.

- HASSAN, G. M. **Deformation measurement in the presence of discontinuities with digital image correlation: A review.** Optics and Lasers in Engineering, v. 137, n. September 2020, 2021.
- HE, R.; SUN, X.; WUA, Y.; TANG, G.; CARVELLI, V. **Biaxial tearing properties of woven coated fabrics using digital image correlation.** Composite Structures, v. 272, n. December 2020, p. 114-206, 2021.
- HIBBELER, R.C. **Mechanics of Materials.** Tenth Edition. Hoboken, NJ: Pearson, 2015.
- HILD, F.; ROUX, S. **Digital Image Correlation: from Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties – a Review.** v. 42, p. 69–80, 2006.
- JÄHNE, B. **Digital Image Processing.** 6th. ed. Heidelberg: Springer, 2005.
- JANELIUKSTIS, R.; CHEN, X. **Review of Digital Image Correlation Application to Large-Scale Composite Structure Testing.** Composite Structure, v. 271, n. April, p. 114-143, 2021.
- JOVANI, T.; CHANAL, H.; BLAYSAT, B.; GRÉDIAC, M. **Residual Stress Maps Determination with global Digital Image Correlation.** ScienceDirect. Elsevier B. V. 6th CIRP Conference on Surface Integrity. Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, France, 2022.
- BARRETO JUNIOR, E. **Utilização do método de correlação de imagens na caracterização de materiais metálicos e poliméricos.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2008.
- KELLY, B. P.; SILVA, C. R.; LEHRMAN, J. N.; SAWA, A. G. U.; PEREIRA, B. A.; GODZIK, J. TURNER, J. D. **Use of digital imaging correlation techniques for full-field strain distribution analysis of implantable devices and tissue in spinal biomechanics research.** Journal of Biomechanics, v. 135, 111025, 2022.
- KILIC, I.; KAYACAN, O. **A new nonlinear quantizer for image processing within nonextensive statistics.** Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, v. 381, n. 1–2, p. 420–430, 2007.
- MARGEM, J. I. **Estudo das Características Estruturais e Propriedades de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Malva.** Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2013.

- MAYO-CORROCHANO, C.; SÁNCHEZ-APARICIO, L. J.; AIRA, J. R.; SANZ-ARAUZ, D.; MORENO, E.; MELO, J. P. **Assessment of the elastic properties of high-fired gypsum using the digital image correlation method.** Construction and Building Materials, v. 317, 2022.
- MCANDREW, A. **A computational introduction to digital image processing.** Second edition. CRC Press. Meulborne, 2015.
- MCENTEGGART, I. **Extensometers.** Handbook of Solid Experiment Mechanics. Springer: Baltimore, p. 335-346, 2008.
- MUNIANDY, K.; MOHAMAD ARIFF, Z.; ABU BAKAR, A. **Digital image correlation utilization in measuring displacement and strain during plastic film blowing process: A feasibility study.** Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, v. 136, p. 487–500, 2019.
- NIU, Y.; WANG, J.; SHAO, S.; WANG, H.; LEE, H.; PARK, S. B. **A comprehensive solution for electronic packages' reliability assessment with digital image correlation (DIC) method.** Microelectronics Reliability, v. 87, n. June, p. 81–88, 2018.
- ÖZASLAN, E.; YETGIN, B; GÜLER, M. A. **Damage mode identification of open hole composite laminates based on acoustic emission and digital image correlation methods.** Composite Structures, v. 274, n. April 2020, 2021.
- PEREIRA, A. F. G.; PRATES, P.A.; OLIVEIRA, M.C. FERNANDES, J.V. **Normal stress components during shear tests of metal sheets.** International Journal of Mechanical Sciences, v. 164, 2019.
- REMONDINO, F.; SPERA, M.G.; NOCERINO, E.; MENNA F.; NEX, F. **State of the art in high density image matching.** Photogrammetric Record, v. 29, n. 146, p. 144–166, 2014.
- RODRIGUES, J. S. **Estudo da Técnica de Infusão de Resina Aplicada à Fabricação de Compósitos de Matris Poliéster Reforçados por Fibras Naturais da Amazônia.** Tese (Doutorado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Pará. Belém, 2014.
- ROSAS, J. D. L. **Implementação de um sistema para medição das deformações no plano pela técnica de correlação digital de imagem.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 2019.

- SALETTI, D.; FORQUIN, P. **A comparison of DIC and grid measurements for processing spalling tests with the VFM and an 80-kpixel ultra-high speed camera.** The European Physical Journal, v. 323, p. 311–323, 2015.
- SCHREIER, H. W.; SUTTON, M. A. **Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions.** Experimental Mechanics, v. 42, n. 3, p. 303–310, 2002.
- SHARPE, W. N. J. **Handbook of Experimental Solid Mechanics.** Baltimore: Springer, 2008.
- SINECEN, M. **Digital Image Processing with MATLAB.** Applications from Engineering with MATLAB Concepts, p. 1–42, 2016.
- SOUZA, J. A. S. **Estudo e Avaliação do Uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria-Prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil.** Tese (Doutorado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Pará. Belém, 2010.
- SU, Y.; ZHANG, Q.; GAO, Z. **Statistical model for speckle pattern optimization.** Optics Express, v. 25, n. 24, p. 7037–7048, 2017.
- SUTTON, M. A. **Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurement.** Handbook of Experimental Solid Mechanics. New York: Springer, 2008.
- SUTTON, M. A.; ORTEU, J.-J.; SCHREIER, H. W. **Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements - Basic Concepts, Theory and Applications.** New York: Springer, p. 565-600, 2009.
- SUTTON, M. A.; MATTA, F.; RIZOS, D.; GHORBANI, R.; RAJAN, S.; MOLLENHAUER, D.H.; SCHREIER, H.W.; LASPRILLA, H. W. **Recent Progress in Digital Image Correlation: Background and Developments since the 2013 W M Murray Lecture.** Experimental Mechanics, p. 1–30, 2017.
- TUSHEV, S. A. **Parallel Algorithms for Effective Correspondence Problem Solution in Computer Vision.** Bulletin of the South Ural State University. Series “Computational Mathematics and Software Engineering”, v. 6, n. 2, p. 49–68, 2017.
- UMBAUGH, S.E. **Digital Image Processing and Analysis – Applications with Matlab and CVIP Tools.** Third Edition. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2018.
- WANG, Z.; KIEU, H.; NGUYEN, H.; LE, M. **Digital image correlation in experimental mechanics and image registration in computer vision: Similarities, differences and complements.** Optics and Lasers in Engineering, v. 65, p. 18–27, 2015.

- XU, X.; SU, Y.; CAI, Y.; CHENG, T.; ZHANG, Q. **Effects of Various Shape Functions and Subset Size in Local Deformation Measurements Using DIC.** *Experimental Mechanics*, v. 55, n. 8, p. 1575–1590, 2015.
- YANG, R.; LI, Y.; ZENG, D.; GUO, P. **Deep DIC: Deep learning-based digital image correlation for end-to-end displacement and strain measurement.** Elsevier B. V. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 302, 117474, 2022.
- YAO, Y.; NI, Y.; HE, L. H. **Rutile-mimic 3D metamaterials with simultaneously negative Poisson's ratio and negative compressibility.** *Materials and Design*, v. 200, 2021.
- YAROSLAVSKY, L. P. **Theoretical Foundations of Digital Image Using Matlab.** CRC Press, Boca Raton, 2013.
- ZDERO, R.; SHAH, S.; GOSHULAK, P. **Surface Strain Gage Testing of Whole Bones and Implants.** *Experimental Methods in Orthopaedic Biomechanics*. p. 33-48, 2017.
- ZHOU, K.; LEI, D.; HE, J.; ZHANG, P.; BAI, P.; ZHU, F. **Real-time localization of micro-damage in concrete beams using DIC technology and wavelet packet analysis.** *Cement and Concrete Composites*, v. 123, n. October 2020, p. 104-198, 2021.