

**UNIVERSIDADE BRASIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA  
CAMPUS ITAQUERA**

**ANTÔNIO CARLOS DE CARVALHO**

**Sistema de vídeo extensômetro universal para simulação, previsão e indicação  
das propriedades mecânicas dos materiais**

**Universal extensometer video system for simulating, predicting and indicating  
the mechanical properties of materials**

São Paulo – SP  
2023

---

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA**

**ANTÔNIO CARLOS DE CARVALHO**

**Sistema de vídeo extensômetro universal para simulação, previsão e indicação das propriedades mecânicas dos materiais**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica da Universidade Brasil, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Biomédica.

Prof. Dr. Mardoqueu Martins Costa  
**Orientador**

São Paulo– SP  
2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade Brasil,  
com os dados fornecidos pelo (a) autor (a).**

C321s CARVALHO, Antônio Carlos de.

Sistema de vídeo extensômetro universal para simulação, previsão e indicação das propriedades mecânicas dos materiais / Antônio Carlos de Carvalho -- Itaquera: Universidade Brasil, 2023.

154 f.: il. color.

Tese de Doutorado defendida no Programa de Pós-graduação do Curso de Engenharia Biomédica da Universidade Brasil.

Orientação: Prof. Dr. Mardoqueu Martins da Costa.

1. Vídeo extensômetro. 2. Propriedades mecânicas. 3. Ensaio de tração. 4. Simulação. 5. Engenharia Biomédica. I. Costa, Mardoqueu Martins da. II. Título.

CDD 620.1124



## TERMO DE APROVAÇÃO

ANTÔNIO CARLOS CARVALHO

**“SISTEMA DE VÍDEO EXTENSÔMETRO UNIVERSAL PARA SIMULAÇÃO,  
PREVISÃO E INDICAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS”**

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica** da Universidade Brasil, pela seguinte banca examinadora:

Prof(a). Dr(a). Mardoqueu Martins da Costa (Presidente-Orientador)

Dr.(a) Priscila Pereira Favero (Membro Interno)

Dr.(a) Alessandro Marcio Hakme da Silva (Membro Interno)

Dr.(a) Emery Cleiton Cabral Correia Lins (Membro Externo)

Dr.(a) João Roberto Broggio (Membro Externo)

São Paulo, 25 de setembro de 2023.

Presidente da Banca Prof.(a) Dr.(a) Mardoqueu Martins da Costa

Houve alteração do Título: sim ( ) não ( X ):

---

---

---



## Termo de Autorização

### Para Publicação de Dissertações e Teses no Formato Eletrônico na Página WWWdo Respeetivo Programa da Universidade Brasil e no Banco de Teses da CAPES

Na qualidade de titular(es) dos direitos de autor da publicação, e de acordo com a Portaria CAPES no. 13, de 15 de fevereiro de 2006, autorizo(amos) a Universidade Brasil a disponibilizar através do site <http://www.universidadebrasil.edu.br>, na página do respectivo Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, bem como no Banco de Dissertações e Teses da CAPES, através do site <http://bancodeteses.capes.gov.br>, a versão digital do texto integral da Dissertação/Tese abaixo citada, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira.

A utilização do conteúdo deste texto, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, fica condicionada à citação da fonte.

TÍTULO DO TRABALHO: ***“SISTEMA DE VÍDEO EXTENSÔMETRO UNIVERSAL PARA SIMULAÇÃO, PREVISÃO E INDICAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS”***

#### Autor(es):

Discente: **Antônio Carlos de Carvalho**

Assinatura: \_\_\_\_\_

Orientador(a): **Prof.(a) Dr.(a) Mardoqueu Martins da Costa**

Assinatura: \_\_\_\_\_

Coorientador(a): **Prof.(a) Dr.(a)**

Assinatura: \_\_\_\_\_

Houve alteração do Título: sim ( ) não ( X ):

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

PRIMEIRAMENTE A DEUS, pela força e entusiasmo de viver.

A minha esposa Maria Aparecida e meus filhos Giovane, Rodolfo e Henrique, por não terem medido esforços, dedicação e compreensão nas horas difíceis, e por me proporcionarem alegrias e forças para continuar a caminhar e sorrir.

Aos meus pais Maria e Ataíde, por não terem medido sacrifícios ao me darem educação. Aos meus irmãos Ione, Diná, Junior e Tânia.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mardoqueu Martins da Costa, por sua dedicação, disposição, capacidade de transmitir e atenção dedicada a mim.

Aos meus colegas do Instituto Federal de São Paulo (IFSP) campus de Votuporanga pelo apoio e contribuição oferecida a realização de meu trabalho.

Ao técnico Leonardo do laboratório de mecânica, pelo apoio e contribuição oferecida.

## RESUMO

A vídeo extensometria é uma técnica de aquisição e processamento de imagens que realiza a medição das deformações dos materiais, durante o ensaio de tração, obtendo dados confiáveis e que são indispensáveis no desenvolvimento de materiais biomédicos. Entretanto, percebe-se uma lacuna significativa tanto na literatura científica quanto no mercado atual em relação a sistemas de vídeo extensômetros universais, caracterizada pela falta de uma ferramenta capaz de realizar simulações, previsões e análises detalhadas das propriedades mecânicas dos materiais de forma eficiente e econômica. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar um vídeo extensômetro universal para simulação, previsão e indicação das propriedades mecânicas dos materiais. Este trabalho foi dividido em duas etapas, sendo a primeira o desenvolvimento de um *hardware* com a utilização de célula de carga, conectada a um módulo ADC, acoplado a um Arduino por meio de uma comunicação SPI, estabelecendo uma comunicação serial com o programa principal do MATLAB e uma câmera com comunicação serial com o programa. A segunda etapa foi o desenvolvimento do *software* de vídeo sequência de simulação utilizando a ferramenta de desenvolvimento chamada MATLAB. Foram realizados oito ensaios iniciais de tração comparativos físicos e simulados em uma máquina universal, por meio de vídeo sequência em dois materiais distintos, alumínio e borracha, com perfis retangulares de comprimento de 165 mm e largura de 13 mm. A espessura variou para cada tipo de material: 0,31 mm para o alumínio e 2,5 mm para a borracha. Todos os ensaios foram realizados a uma velocidade de 10 mm/min. Os resultados demonstraram uma precisão de deslocamento menores que 0,033%; os limites de resistência nos ensaios apresentaram um erro máximo 7,77%; e, na tensão de ruptura, um erro máximo de 10,18%; no módulo de elasticidade, entre o valor medido pelo *software* desenvolvido e o cálculo pela literatura houve um erro de, no máximo, 0,002%. O *software* foi capaz de traçar a curva de tensão/deformação com pontos de interesse e oferece percepções valiosas sobre a curva de aprendizado do sistema. Conclui-se que os resultados apresentados, neste trabalho, buscam contribuir para o avanço das técnicas de análise de materiais biomédicos, visando maior precisão e eficácia. Além disso, o modelo discutido demonstrou níveis significativos de maturidade tecnológica, indicando um alto potencial de sucesso no mercado de extensômetros para materiais biomédicos.

Palavras-chave: vídeo extensômetro; Propriedades mecânicas; Ensaio de tração, Simulação; Engenharia Biomédica.

## ABSTRACT

Video Extensometer is an image acquisition and processing technique that measures the deformation of materials during tensile testing and provides reliable data essential for the development of biomedical materials. However, there is a significant gap in both the scientific literature and the current market in terms of universal video extensometer systems, characterized by the lack of a tool capable of performing detailed simulations, predictions, and analyzes of the mechanical properties of materials in an efficient and economical manner. In this context, the objective of this work was to develop and validate a universal video extensometer for simulation, prediction and indication of the mechanical properties of materials. This work was divided into two stages, the first being the development of *hardware* using a load cell, connected to an ADC module, coupled to an Arduino through SPI communication, establishing serial communication with the main program of the MATLAB and a camera with serial communication with the program. The second stage was the development of the video simulation sequence *software* using the development tool called MATLAB. Eight initial physical and simulated comparative tensile tests were carried out on a universal machine, using video sequence on two different materials, aluminum and rubber, with rectangular profiles 165 mm long and 13 mm wide. The thickness varied for each type of material: 0.31 mm for aluminum and 2.5 mm for rubber. All tests were carried out at a speed of 10 mm/min. The results demonstrated a displacement accuracy of less than 0.033%; the resistance limits in the tests showed a maximum error of 7.77%; and, at rupture voltage, a maximum error of 10.18%; in the elasticity modulus, between the value measured by the developed *software* and the calculation in the literature there was an error of, at most, 0.002%. The *software* was able to plot the stress/strain curve with points of interest and provided valuable insights into the system's learning curve. It is concluded that the results presented in this work seek to contribute to the advancement of techniques for analyzing biomedical materials, aiming for greater precision and effectiveness. Furthermore, the model discussed demonstrated significant levels of technological maturity, indicating a high potential for success in the extensometer market for biomedical materials.

**Keywords:** video extensometer; Mechanical properties; Tensile test, Simulation; Biomedical engineering.

## DIVULGAÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO

A vídeo extensometria é uma técnica de aquisição e processamento de imagens que mede as deformações dos materiais durante ensaios de tração, fornecendo dados confiáveis para o desenvolvimento de materiais biomédicos. O emprego de métodos de simulação proporciona uma compreensão mais abrangente e eficaz dos processos, permitindo análises prévias à fabricação. No entanto, a complexidade e os custos elevados dos *softwares* comerciais disponíveis atualmente restringem o acesso a essas tecnologias. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e validação de um vídeo extensômetro completo, abrangendo tanto o *software* quanto o *hardware*, destinado à análise e simulação de ensaios de tração na área da engenharia biomédica. O projeto foi dividido em duas etapas: o desenvolvimento de *hardware* com célula de carga, módulo ADC e placa de controle, conectados via SPI, permitindo comunicação serial com o MATLAB e uma câmera e A segunda etapa foi o desenvolvimento do *software* de vídeo sequência de simulação utilizando a MATLAB. Foram realizados oito ensaios iniciais de tração comparativos físicos e simulados em uma máquina universal, por meio de vídeo sequência em dois materiais distintos, alumínio e borracha, com perfis retangulares. Os resultados mostraram que o *hardware* e *software* desenvolvido é altamente eficiente, com erro inferior a 0,033% precisão de deslocamento, erro máximo de 4,32% nos limites de resistência e 2,66% na tensão de ruptura para o alumínio, modulo elasticidade e o cálculo pela literatura houve um erro de, no máximo, 0,002%. Além disso, ele pode localizar pontos de interesse em curvas de tensão/deformação e criar a curva de aprendizado com ensaios reais.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução do extensômetro de contato. ....	22
Figura 2. Extensômetro mecânico, modelo MSM31. ....	23
Figura 3. Extensômetro braço tensor, modelo AutoX750. ....	24
Figura 4. Extensômetro elétrico, modelo uniaxial. ....	25
Figura 5. Extensômetro acústico, modelo RST2106. ....	27
Figura 6. Evolução do extensômetro de não contato. ....	28
Figura 7. Extensômetro de fibra óptica, modelo Epsilon ONE. ....	29
Figura 8. Extensômetro laser, modelo LE-05. ....	30
Figura 9. Comportamento da deformação dos materiais aplicados uma tensão. ....	39
Figura 10. Fase de deformação do material frágil e dúctil em relação aplicada com a relação a deformação. ....	40
Figura 11. Etapas de ruptura dos materiais no ensaio de tração. ....	42
Figura 12. Ponto "P" em que o ângulo se altera define o limite de elasticidade. ....	44
Figura 13. Curva característica do limite de escoamento. ....	44
Figura 14. Deformação normal média. ....	46
Figura 15. Deformação cisalhante. ....	47
Figura 16. Representa as fases do nível de maturidade tecnológica. ....	52
Figura 17. Desenho esquemático do vídeo extensômetro de baixo custo. ....	59
Figura 18. Célula de carga com capacidade de 2kN. ....	59
Figura 19. Componentes eletrônicos para a montagem do circuito de ensaio de tração. ....	60
Figura 20. Câmera utilizada nos ensaios. ....	60
Figura 21. Máquina de ensaio DL 3000 – Emic. ....	65
Figura 22. Corpo de prova. ....	66
Figura 23. Montagem dos equipamentos para realização dos ensaios. ....	67
Figura 24. Montagem do prolongador metálico para coleta dos dados. ....	68
Figura 25. Montagem do <i>hardware</i> para vídeo extensômetro. ....	71
Figura 26. Tela principal software desenvolvido. ....	72
Figura 27. Ilustra a região de interesse. ....	73
Figura 28. Ponto de detecção para análise. ....	73
Figura 29. Ponto centralizado para iniciar o ensaio. ....	74
Figura 30. Ilustra a parametrização da célula de carga. ....	75
Figura 31. Tela para configurar antes do início do ensaio. ....	75

Figura 32. Tela para salvar os dados do gráfico e o vídeo extensômetro. ....	76
Figura 33. Código do <i>software</i> para cálculo do módulo de Young. ....	77
Figura 34. Detalhe do Módulo de Young ou Módulo de Elasticidade no alumínio. ...	78
Figura 35. Código do <i>software</i> para cálculo do limite elástico. ....	79
Figura 36. Detalhe para o limite elástico no alumínio. ....	79
Figura 37. Código do <i>software</i> para cálculo do limite de escoamento. ....	80
Figura 38. Detalhe para o limite escoamento no alumínio. ....	81
Figura 39. Código do <i>software</i> para localização do limite de resistência. ....	81
Figura 40. Detalhe para limite de resistência no alumínio. ....	82
Figura 41. Curvas dos ensaios em alumínio com as respectivas curvas de aprendizado. ....	83
Figura 42. Curva tensão x deformação no ensaio realizado em alumínio na máquina universal. ....	83
Figura 43. Curva tensão x deformação no ensaio realizado em alumínio no <i>software</i> desenvolvido. ....	84
Figura 44. Curva tensão x deformação em alumínio na amostra 1. ....	85
Figura 45. Pontos de ensaio físico na amostra 3 de alumínio. ....	86
Figura 46. Corpos de prova em alumínio antes e após os ensaios. ....	86
Figura 47. Etapas do vídeo no rompimento dos corpos de prova em alumínio. ....	87
Figura 48. Código do <i>software</i> para cálculo do módulo de Young. ....	88
Figura 49. Detalhe do módulo de Young ou módulo de elasticidade em borracha. ...	88
Figura 50. Código do <i>software</i> para cálculo do limite elástico. ....	89
Figura 51. Detalhe para o limite elástico em borracha. ....	90
Figura 52. Código do <i>software</i> para cálculo do limite de escoamento ....	90
Figura 53. Detalhe para o limite escoamento na borracha. ....	91
Figura 54. Código do <i>software</i> para localização do limite de resistência. ....	91
Figura 55. Detalhe para limite de resistência. ....	92
Figura 56. Curvas dos ensaios em borracha com as respectivas curvas de aprendizado. ....	93
Figura 57. Curva tensão x deformação no ensaio em borracha realizado na máquina universal. ....	93
Figura 58. Curva tensão x deformação no ensaio realizado em borracha no <i>software</i> desenvolvido. ....	94
Figura 59. Curva tensão x deformação em borracha na amostra 4. ....	95
Figura 60. Pontos de ensaio físico na amostra 4 de borracha. ....	96

Figura 61. Corpos de prova em borracha antes e após os ensaios. ....	96
Figura 62. Etapas do vídeo no rompimento dos corpos de prova em borracha. ....	97
Figura 63. Posição 1 do paquímetro com o prolongador metálico. ....	100
Figura 64. Posição 14 do paquímetro com o prolongador metálico. ....	100
Figura 65. Plotagem dos pontos para verificação da precisão do <i>software</i> desenvolvido. ....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens de extensômetro elétrico. ....	26
Tabela 2. Limite n de escoamento para metais. ....	45
Tabela 3. Definição dos níveis de maturidade tecnológica (TRL/MRL).....	52
Tabela 4. Principais características técnicas das máquinas de ensaio DL. ....	65
Tabela 5. Medidas para análise da precisão dos resultados do vídeo extensômetro. .....	69
Tabela 6. Resultados dos ensaios físicos pela máquina universal na amostra de alumínio. ....	84
Tabela 7. Resultados dos ensaios físicos pelo vídeo extensômetro desenvolvido na amostra de alumínio. ....	85
Tabela 8. Resultados dos ensaios físicos pela máquina universal na amostra de borracha.....	94
Tabela 9. Resultados dos ensaios físicos pelo vídeo extensômetro desenvolvido na amostra de borracha.....	95
Tabela 10. Erro dos pontos de Limite de Resistência e Tensão de Ruptura.....	98
Tabela 11. Análise Módulo de Elasticidade e Limite Elástico das amostras. ....	99
Tabela 12. Valores comparativos de custo do modelo desenvolvido e o comercial..	99
Tabela 13. Medição para precisão das medidas do vídeo extensômetro desenvolvido. .....	101

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADC	Conversor Analógico Digital
DIC	Correlação de imagens digitais
DIC-2D	Correlação de Imagem Digital em duas dimensões
DIC-3D	Correlação de Imagem Digital em três dimensões
FBG	Grade de Bragg de Fibra
HB	Unidade de medida da dureza
kN	Kilo Newton
LPDE	Polímeros de baixa densidade
Mm	Milímetros
MPa	Mega pascal
SPI	Interface Periférica Serial
TRL	Technology Readiness Level (Nível de maturidade tecnológica)

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção do espécime ( $m^2$ )
e	Fim da região elástica
E	Módulo de Young
$f_1, f_2$	Região de escoamento
l	Comprimento final
L	Comprimento do espécime (m)
$l_0$	Comprimento inicial
P	Força aplicada
r	Ponto de máxima tensão (instabilidade plástica)
R	Resistência elétrica de um espécime uniforme do material( $\Omega$ ) - Ohm
$S_0$	Área inicial da seção da força
Z	Ruptura
$\epsilon$	Deformação de engenharia (é uma grandeza adimensional e representa um valor médio específico da deformação tomado sobre a extensão do segmento observado)
$\lambda$	Alongamento relativo
$\rho$	Resistividade elétrica ( $\Omega m$ )
$\sigma$	Tensão de engenharia (representa o esforço necessário para manter o equilíbrio do sistema)
$\sigma_E$	Tensão limite de elasticidade
$\sigma_e$	Tensão de escoamento
$\sigma_p$	Tensão limite de proporcionalidade
$\sigma_R$	Tensão de ruptura NB
W/mK	Watts por metro kelvin

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>20</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>21</b>
3.1	FUNDAMENTOS DA EXTENSIOMETRIA .....	21
3.2	TIPOS DE EXTENSIOMETRIA .....	22
<b>3.2.1</b>	<b>Extensômetro de contato</b> .....	<b>22</b>
3.2.1.1	Extensômetro mecânico .....	23
3.2.1.2	Extensômetro elétricos .....	24
3.2.1.3	Extensômetro fio vibratório ou acústico .....	26
<b>3.2.2</b>	<b>Extensômetro de não contato</b> .....	<b>27</b>
3.2.2.1	Extensômetro de fibra óptica .....	28
3.2.2.2	Extensômetro laser .....	29
3.2.2.3	Extensômetro vídeo.....	31
3.3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA EXTENSIOMETRIA .....	37
<b>3.3.1</b>	<b>Ensaio de tração</b> .....	<b>38</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Diagrama tensão - deformação</b> .....	<b>38</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Módulo Young ou elasticidade</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Limite de escoamento</b> .....	<b>44</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Limite de resistência</b> .....	<b>45</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Aprendizado</b> .....	<b>47</b>
<b>3.3.7</b>	<b>Curva teórica</b> .....	<b>50</b>
<b>3.3.8</b>	<b>Sinal no tempo discreto</b> .....	<b>51</b>
3.4	NÍVEL MATURIDADE TECNOLÓGICA (TRL/MRL) .....	51
3.5	APLICAÇÃO DO VÍDEO EXTENSOMETRO NA ENGENHARIA BIOMÉDICA .....	53
<b>3.5.1</b>	<b>Engenharia de reabilitação</b> .....	<b>54</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Engenharia médica</b> .....	<b>55</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Engenharia clínica ou hospitalar</b> .....	<b>56</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Bioengenharia</b> .....	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>59</b>
4.1	VÍDEO EXTENSOMETRO ( <i>HARDWARE</i> ).....	59
4.2	DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i> .....	61
<b>4.2.1</b>	<b>Aquisição de dados</b> .....	<b>61</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Loop de processamento</b> .....	<b>62</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Análise de dados capturados</b> .....	<b>62</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Interface gráfica</b> .....	<b>63</b>
4.3	ENSAIOS FÍSICOS .....	64
<b>4.3.1</b>	<b>Equipamento para ensaios</b> .....	<b>64</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Ensaios experimentais com diferentes materiais</b> .....	<b>65</b>
4.3.2.1	Ensaio experimental com alumínio.....	66
4.3.2.2	Ensaio experimental com borracha .....	66
4.3.2.3	Protocolo experimental .....	67

4.4	MEDIÇÃO E PRECISÃO VÍDEO EXTENSÔMETRO .....	68
4.5	NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA (TRL/MRL) .....	69
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>71</b>
5.1	DESENVOLVIMENTO DO VIDEO EXTENSÔMETRO ( <i>HARDWARE</i> ) .....	71
5.2	DESENVOLVIMENTO DE <i>SOFTWARE</i> (MATLAB) .....	71
5.2.1	<b>Interface do software .....</b>	<b>72</b>
5.3	ENSAIO EXPERIMENTAL .....	77
5.3.1	<b>Ensaio experimental com alumínio .....</b>	<b>77</b>
5.3.1.1	Função módulo de Young ou módulo de elasticidade no alumínio ..	77
5.3.1.2	Função limite elástico no alumínio.....	78
5.3.1.3	Função limite de escoamento no alumínio .....	80
5.3.1.4	Função limite de resistência alumínio.....	81
5.3.1.5	Função curva do aprendizado alumínio.....	82
5.3.2	<b>Ensaio experimental com borracha .....</b>	<b>87</b>
5.3.2.1	Função módulo de Young ou módulo de elasticidade na borracha..	87
5.3.2.2	Função limite elástico na borracha .....	89
5.3.2.3	Função limite de escoamento na borracha.....	90
5.3.2.4	Função limite de resistência borracha .....	91
5.3.2.5	Função curva do aprendizado borracha .....	92
5.3.3	<b>Delimitação técnica .....</b>	<b>99</b>
5.4	NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA (TRL/MLR) .....	102
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>104</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>106</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO A – CÓDIGO DO ARDUINO.....</b>	<b>114</b>
<b>9</b>	<b>ANEXO A – CÓDIGO DO SOFTWARE.....</b>	<b>126</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A importância da engenharia de materiais no mundo contemporâneo tem crescido significativamente ao longo dos anos, impulsionada pela demanda crescente por maior confiabilidade e eficiência dos materiais empregados em projetos e construções nas diversas áreas da engenharia. Um exemplo marcante dessa evolução na busca por maior confiabilidade está na comparação entre os navios e aviões fabricados atualmente e aqueles construídos em décadas anteriores. Atualmente, durante a elaboração de um projeto, as características estruturais dos materiais a serem utilizados são consideradas com muito mais rigor, avaliando-se sua capacidade de resistir a adversidades ao longo do tempo (BRIZOLA, 2007).

O ensaio de tração é um método largamente utilizado para determinar as propriedades mecânicas dos materiais, atuando como uma ferramenta vital na engenharia de materiais. Durante esse ensaio, um corpo de prova é submetido a uma carga axial que provoca uma deformação até que ocorra a ruptura do material. A partir dos dados coletados, é possível calcular propriedades mecânicas cruciais, tais como o limite de resistência à tração, o limite de escoamento e o módulo de elasticidade. Essas informações são fundamentais para o desenvolvimento de projetos em diversas áreas da engenharia, visto que permitem avaliar o comportamento do material sob variadas condições de carga e ambientes. (CALLISTER, 2002).

Os extensômetros de vídeo representam uma técnica de medição sem contato, que utiliza câmeras de alta resolução para capturar imagens da superfície do corpo de prova durante um ensaio mecânico. Estas imagens são processadas por *software* especializado que monitora a posição dos pontos de interesse marcados na superfície do corpo de prova. Esses extensômetros se destacam por sua precisão e confiabilidade, podendo ser aplicados em uma ampla variedade de materiais e condições de teste. São amplamente utilizados em laboratórios de engenharia de materiais para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais (COLLEGES, 2005).

O emprego de um extensômetro de vídeo, aliado a um sistema de aquisição de dados de tensão, pode configurar uma solução eficiente e precisa para avaliar as propriedades mecânicas de um material através de ensaios de tração. Este sistema gera um arquivo contendo os resultados do ensaio, que inclui o gráfico de tensão versus deformação, as propriedades mecânicas calculadas e o relatório de ensaio. Isso facilita significativamente o trabalho do operador, eliminando a necessidade de cálculos manuais a partir de um gráfico gerado automaticamente pelo equipamento.

Além disso, o sistema pode ser adaptado para atender às necessidades específicas do usuário, proporcionando maior flexibilidade e facilidade de uso *Software* MATLAB (MATHWORKS, 2023).

Na engenharia biomédica, onde os avanços científicos desempenham um papel crucial no desenvolvimento de tecnologias inovadoras, observamos notáveis progressos alcançados por pesquisadores e empresas. Embora esses avanços proporcionem resultados de alto desempenho, é comum que estejam associados a custos elevados. No entanto, uma lacuna significativa se destaca na literatura e no mercado atual: a ausência de um sistema universal de vídeo extensômetro capaz de realizar simulações, previsões e análises das propriedades mecânicas dos materiais de maneira eficaz e acessível em termos de custo.

Nesse contexto específico da engenharia biomédica, a demanda por uma ferramenta versátil e economicamente viável para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais é crucial. Portanto, o desenvolvimento de um vídeo extensômetro específico para esta aplicação tem como principal propósito preencher essa lacuna, oferecendo uma solução eficiente e acessível para simulações, previsões e análises na área biomédica. Isso não apenas impulsiona a pesquisa e desenvolvimento nesse campo, mas também contribui para o avanço de tecnologias voltadas para aplicações biomédicas inovadoras e acessíveis.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é desenvolver e validar um vídeo extensômetro universal para simulação, previsão e indicação das propriedades mecânicas dos materiais biomédicos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver e validar a eletrônica de aquisição de valores de força.
- Criar um *software* de fácil manuseio e acesso, destinado a instituições de ensino e pesquisa nacionais.
- Implementar funcionalidades como gravação de ensaios, interface visual intuitiva, parametrização e aumento da confiabilidade dos dados.
- Facilitar a geração de gráficos que representem a deformação em função da tensão, simulando os ensaios físicos.
- Permitir a análise detalhada de deformações localizadas e identificação de pontos críticos.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 FUNDAMENTOS DA EXTENSIOMETRIA

Por volta de 1856, Willian Thomsom deu início ao desenvolvimento da extensometria, conduzindo experimentos práticos utilizando cobre e ferro para verificar como a resistência elétrica desses materiais variava com a deformação da estrutura (PORTINOI, 2023). Embora suas descobertas tenham sido valiosas, Roy Carlson foi quem verdadeiramente desenvolveu o princípio do extensômetro de fio livre entre 1930 e 1940 (WINDLIN, 2023). Esses extensômetros ainda são amplamente utilizados atualmente em transdutores de pressão, aceleração, torção, entre outros, graças à sua excelente estabilidade (HOFFMAN, 1989).

A extensometria é uma técnica experimental empregada para medir esforços e deformações, fundamentando-se na alteração da resistência elétrica de um material quando submetido a tensões (SANTOS, 2011).

No passado, a extensometria era a única técnica disponível para medir deformações, mas com o avanço do Método dos Elementos Finitos (MEF), tornou-se possível determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais de maneira numérica. Como resultado, o MEF tem sido cada vez mais utilizado para a análise de deformações e a extensometria tem sido menos utilizada. Apesar disso, continua sendo uma fonte confiável de resultados, pois baseia-se em medições experimentais ao invés de cálculos teóricos (FIALHO, 2002).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica poderosa para análise de problemas mecânicos e estruturais, mas é importante destacar que a sua utilização requer um bom conhecimento teórico e prático sobre a mecânica dos sólidos e estruturas, além de uma capacitação no uso de softwares específicos para a resolução numérica dos problemas. A falta de entendimento desses fundamentos pode levar a erros na interpretação dos resultados e comprometer a confiabilidade dos estudos. Por isso, é essencial que os usuários tenham uma formação adequada e busquem aprimorar seus conhecimentos teóricos e práticos para garantir uma utilização correta e eficiente do MEF. Além disso, o uso indiscriminado de programas pode levar a erros na interpretação dos resultados, comprometendo a precisão das análises. Por isso, é importante que o usuário tenha um conhecimento sólido em mecânica estrutural, matemática e técnicas computacionais para garantir a precisão e confiabilidade das análises realizadas com o método de elementos finitos. É

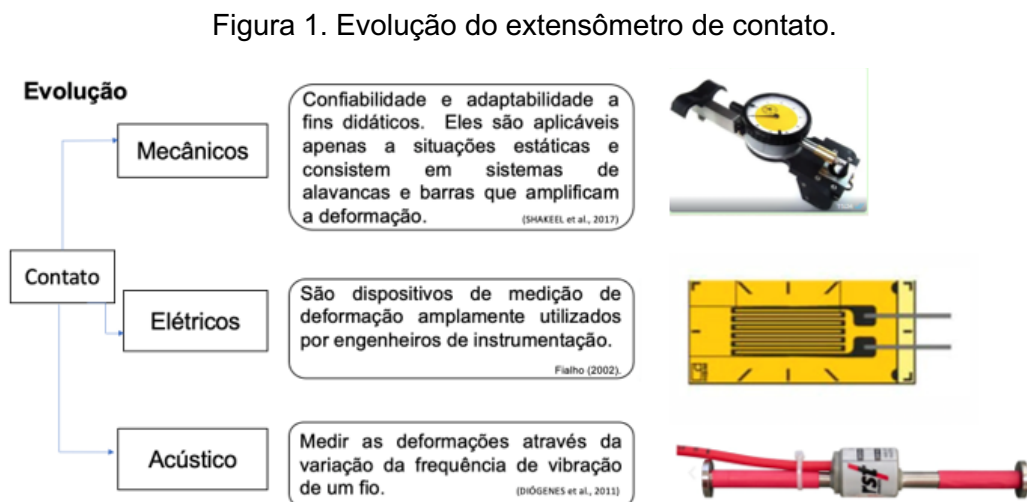
fundamental que o usuário compreenda os fundamentos da técnica e possa interpretar corretamente os resultados obtidos com o *software*. Assim, será possível obter resultados mais precisos e confiáveis, mesmo sem a ajuda de programas com interfaces intuitivas (AZEVEDO, 2003).

### 3.2 TIPOS DE EXTENSIOMETRIA

Os extensômetros podem ser divididos em dois tipos principais, dependendo do método de medição utilizado: extensometria "de contato" e extensometria "sem contato" (PIERNAS e colaboradores, 2004)

#### 3.2.1 Extensômetro de contato

Os extensômetros de contato são aqueles que precisam estar em contato direto com o material a ser medido. Eles são os extensômetros mais antigos e têm sido amplamente utilizados por muitos anos, até o surgimento dos extensômetros sem contato. Atualmente, eles ainda são amplamente utilizados devido à sua facilidade de uso e baixo custo do equipamento (SALMÁN, 2020). A Figura 1, ilustra a evolução do extensômetro de contato.



Fonte: Autoria própria.

Existem diferentes tipos de extensômetros, e eles podem ser classificados de acordo com o princípio de funcionamento e aplicação, vou citar 3 tipos: mecânico, elétrico e acústico (PIERNAS e colaboradores, 2004).

### 3.2.1.1 Extensômetro mecânico

Os extensômetros mecânicos são uma opção popular para aplicações onde é necessária uma medição de alta precisão com instrumentação básica. Eles são comumente usados como extensômetros de referência em normas internacionais de testes extensométricos. Eles podem ser configurados de várias maneiras e podem medir deslocamentos com alongamentos muito baixos, variando de menos de 1mm até mais de 100mm. Além disso, esses extensômetros são acessíveis e fáceis de usar (SHAKEEL e colaboradores, 2017). A Figura 2 ilustra um exemplo de um extensômetro mecânico.

Figura 2. Extensômetro mecânico, modelo MSM31.



Fonte: MeasureX Pty Ltd., (2023)

As limitações e erros associados aos primeiros extensômetros, que eram predominantemente mecânicos. Ao longo do tempo, a evolução tecnológica proporcionou o desenvolvimento de uma variedade de dispositivos, destinados à medição precisa de deformações em diferentes contextos. Esses avanços têm aplicação em diversas áreas de pesquisa, incluindo, por exemplo, o acompanhamento do crescimento e recuperação óssea no campo da medicina (PIERNAS e colaboradores, 2004).

Os extensômetros mecânicos automatizados foram aprimorados, dando origem a uma nova geração de extensômetros de braço sensor. Esses extensômetros monitoram os resultados em tempo real e proporcionam maior repetibilidade e precisão dos resultados em comparação com os extensômetros mecânicos convencionais. Eles possuem um contrapeso que quase não tem efeito sobre a

amostra, o que resulta em maior estabilidade do sinal e redução de ruído. Além disso, esses extensômetros podem medir comprimentos maiores (até mais de um metro) sem perder resolução. Eles podem fazer leituras de deformação até  $0,02 \mu\mu$  (SHAKEEL e colaboradores, 2017). A Figura 3 ilustra um exemplo de um extensômetro de braço tensor.

Figura 3. Extensômetro braço tensor, modelo AutoX750.



Fonte: EMIC, (2023)

### 3.2.1.2 Extensômetro elétricos

Os extensômetros elétricos são dispositivos de medição de deformação amplamente utilizados por engenheiros de instrumentação. Eles transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica, sendo o extensômetro a unidade fundamental desses dispositivos (WEBER, 2009).

Os extensômetros elétricos de resistência, conhecidos como strain gauges, desempenham um papel essencial na medição de deformações mecânicas em corpos de prova. Esta técnica envolve a aplicação de extensômetros em áreas de interesse específicas, seguida pela medição da variação em sua resistência elétrica, a qual está diretamente correlacionada com a deformação mecânica. A obtenção dessas leituras implica a conversão da variação de resistência elétrica em uma mudança na diferença de potencial elétrico, seguida por uma amplificação do sinal antes da leitura. Essa abordagem permite medições precisas de deformações em diferentes partes de uma estrutura real durante condições de serviço, sem a necessidade de causar danos.

Essa metodologia viabiliza uma análise quantitativa da distribuição de deformações em situações reais de operação, conforme destacado por (PIERNAS e colaboradores, 2004).

Os extensômetros elétricos são baseados no princípio piezoresistivo, que estabelece uma relação entre a resistência elétrica de um material condutor ou semiconductor e a deformação mecânica aplicada a esse material. A equação 3.1 é uma representação matemática desse princípio. A resistência elétrica do material é medida com precisão e a variação na resistência elétrica devido a deformação é usada para calcular a deformação (FIALHO, 2002):

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (3.1)$$

Onde:

R – Resistência elétrica ( $\Omega$ ) Ohm

$\rho$  – Resistividade elétrica ( $\Omega\text{m}$ )

L – Comprimento (m)

A – Área ( $\text{m}^2$ )

A equação 3.1 mostra como a resistência elétrica de um material condutor ou semiconductor está relacionada ao comprimento e área da seção transversal do material. Quando uma barra de material condutor é submetida à tração, ocorre um alongamento na direção do eixo em que a tensão é aplicada (longitudinal) e uma diminuição na área da seção transversal da barra. Isso resulta em um aumento na resistência elétrica do material. Da mesma forma, quando a barra é comprimida, ocorre uma redução na resistência devido ao aumento na área da seção transversal e diminuição no comprimento. É essa propriedade que permite medir a deformação através da variação da resistência elétrica. Os medidores de tensão são sensores que medem essa resistência e, através de uma relação conhecida, a deformação é obtida (FIALHO, 2002). A Figura 4, ilustra um exemplo de um extensômetro elétrico.

Figura 4. Extensômetro elétrico, modelo uniaxial.



Fonte: ENSUS, (2023)

Existem vários tipos de extensômetros elétricos que utilizam diferentes princípios para medir a deformação. Alguns exemplos incluem:

- **Extensômetros elétricos metálicos:** esses extensômetros são baseados na variação da resistência elétrica de uma barra metálica condutora quando submetida a tração ou compressão.

- **Extensômetros elétricos semicondutores:** esses extensômetros são baseados na variação da resistência elétrica de um material semicondutor, como o silício, quando submetido a tração ou compressão.

- **Extensômetros elétricos por resistência:** esses extensômetros medem a variação da resistência elétrica de uma barra condutora quando submetida a tração ou compressão.

- **Extensômetros elétricos por capacitância:** esses extensômetros medem variação da capacitância elétrica de uma barra condutora quando submetida a tração ou compressão.

- **Extensômetros elétricos fotoelétricos:** esses extensômetros medem a variação da resistência elétrica de uma barra condutora quando submetida a tração ou compressão usando luz infravermelha.

Cada tipo de extensômetro elétrico tem suas próprias vantagens e desvantagens, e é escolhido de acordo com as necessidades específicas da aplicação (VOELZ, 2010). A Tabela 1, ilustra as vantagens e desvantagens do extensômetro elétrico.

Tabela 1. Vantagens e desvantagens de extensômetro elétrico.

Vantagens	Desvantagens
Alta precisão	Sensibilidade a temperatura
Boa sensibilidade	Sensibilidade ao ruído elétrico
Flexibilidade	Influência do fator humano
Fácil instalação	Depende da condição de superfície
Baixo custo	

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.1.3 Extensômetro fio vibratório ou acústico

Os extensômetros acústicos são utilizados para medir as deformações através da variação da frequência de vibração de um fio. Eles são compostos por um fio preso em suas extremidades a duas partes rígidas da estrutura e o circuito é usado para contar o número de ciclos da vibração em um determinado tempo e obter a frequência

de vibração. A frequência de vibração está diretamente relacionada com a tensão do fio e, portanto, com a deformação. São altamente valorizados em aplicações que exigem alta precisão e estabilidade a longo prazo. Eles são especialmente úteis em medições de deformação em ambientes hostis ou em temperaturas elevadas, devido à sua capacidade de suportar essas condições extremas. Sua utilização é recomendada em aplicações que requerem medidas de deformação altamente precisas em situações adversas. (DIÓGENES e colaboradores, 2011).

O deslocamento é calculado de acordo com a seguinte equação 3.2:

$$L - L_0 = k(f^2 - f_0^2) \quad (3.2)$$

Onde:

L – Comprimentos;

K – Constante tensorial;

f – Frequências de vibração.

Este tipo de extensômetro é amplamente utilizado em arquitetura e engenharia para cálculo de deformações em estruturas. Eles são compostos por um fio preso nas extremidades a duas partes rígidas da estrutura e a frequência de vibração do fio é usada para medir a deformação. A ancoragem das extremidades do extensômetro deve ser feita corretamente para garantir estabilidade a longo prazo. Os extensômetros acústicos podem ter um comprimento de fio de 50 a 150 mm e possuem uma resolução de 0,5 um, tornando-os apropriados para medir deformações em estruturas, já que as deformações nelas geralmente são muito pequenas (SOMBRA, 2020). A Figura 5, ilustra um exemplo de um extensômetro acústico.

Figura 5. Extensômetro acústico, modelo RST2106.



Fonte: RST Instruments, (2023)

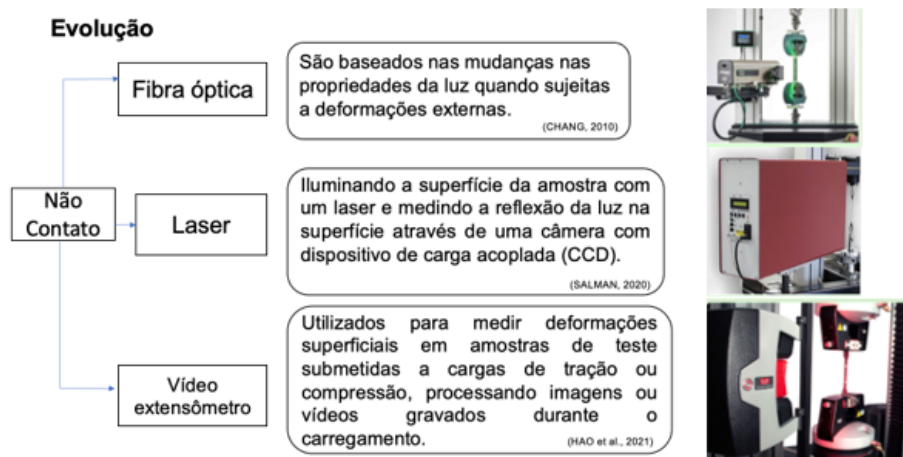
### 3.2.2 Extensômetro de não contato

Baseando em um contato direto com o objeto, o extensômetro de não contato pode ser posicionado a uma distância segura, geralmente alguns centímetros, do

objeto de interesse. Ele usa feixes de luz, lasers ou outras tecnologias ópticas para medir a posição, a forma ou a deformação do objeto sem tocá-lo, também são usados em diversas aplicações, incluindo a medição de tensão e deformação em materiais, testes de fadiga em estruturas, monitoramento de vibrações em máquinas e a análise de movimentos em sistemas biológicos (PEIPONEN; MYLLYLÄ; PRIEZZHEV, 2009).

Além disso, são utilizados na análise em sistemas biomédicos, esses dispositivos permitem medir a deformação e movimentação desses sistemas em resposta a diferentes estímulos, o que pode ajudar a entender melhor a biomecânica do corpo humano e desenvolver novos tratamentos médicos, podemos citar 3 exemplos de extensômetros de não contato: fibra óptica, laser e vídeo (IFJU, 1990). A Figura 6, ilustra a evolução do extensômetro de não contato.

Figura 6. Evolução do extensômetro de não contato.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2.1 Extensômetro de fibra óptica

Os extensômetros de fibra óptica são baseados nas mudanças nas propriedades da luz quando sujeitas a deformações externas. O sistema que detecta a mudança na luz que passa através das fibras ópticas é chamado de sistema de medição óptica, esse sistema pode ser composto por diversos componentes, como fontes de luz, detectores de luz, moduladores, amplificadores e outros dispositivos ópticos. Na verdade, qualquer alteração física ou ambiental pode causar variações na fase, intensidade, comprimento de onda ou polarização da luz que se propaga na fibra óptica (FÉLIX, 2010).

Eles utilizam uma grade de Bragg inscrita em uma fibra óptica (FBG), operando em um princípio diferente dos extensômetros elétricos tradicionais. A variação periódica no índice de refração da fibra óptica causada pela grade de Bragg produz uma variação no comprimento de onda de Bragg quando a fibra é submetida a tensão mecânica. Essa variação pode ser detectada e registrada por um sistema de aquisição de dados (CASCARDO; PABLO; BARBERO, 2014).

Os extensômetros ópticos baseados em sensores FBG oferecem vantagens como estabilidade a longo prazo do sinal e durabilidade, além de menor propensão a falhas mecânicas mesmo em altos níveis de vibração e o comprimento do cabo (CHANG, 2010). A Figura 7, ilustra um exemplo de um extensômetro de fibra óptica.

Figura 7. Extensômetro de fibra óptica, modelo Epsilon ONE.



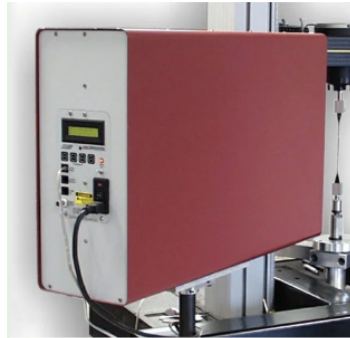
Fonte: PTS-Primo Trade Solution, (2023)

### 3.2.2.2 Extensômetro laser

É um dispositivo de medição que utiliza um feixe de luz laser para determinar a distância entre dois pontos reflexivos em uma amostra. Esse método é baseado no princípio da reflexão da luz e no cálculo do tempo que leva para o laser ser refletido pelos pontos alvos. Existem duas implementações alternativas desse princípio: Extensômetro de Feixe em Leque de Grande Ângulo: Nesse tipo de extensômetro, um feixe de laser é emitido em um ângulo relativamente amplo (geralmente entre 45 e 90 graus) em direção a um espelho giratório. A luz refletida pelo espelho é direcionada para os alvos ópticos reflexivos na amostra. Um detector óptico detecta a energia refletida e calcula a distância entre os alvos com base no tempo que leva para a luz percorrer o caminho de ida e volta. Esse tipo de extensômetro é adequado para medir grandes extensões e é usado em testes de alto alongamento de materiais como borrachas e elastômeros. No entanto, ele geralmente tem uma resolução relativamente baixa, da ordem de 10 a 100 micrômetros. Extensômetro com Feixe

Escaneado Paralelo: Nessa implementação, um sistema óptico mais sofisticado é usado para produzir um feixe de laser escaneado paralelo. Esse feixe escaneado é direcionado para os alvos reflexivos na amostra, e a distância entre os alvos é calculada com base no tempo de reflexão. Esse tipo de extensômetro geralmente oferece uma resolução muito maior do que o primeiro método, mas tem um alcance de extensão menor. A escolha entre essas implementações depende das necessidades específicas de medição, incluindo a extensão a ser medida e a resolução desejada. Extensômetros a laser são frequentemente usados em aplicações onde a medição precisa e sem contato da deformação é crucial, como em testes de materiais, pesquisa científica e monitoramento de estruturas. É importante notar que esses extensômetros a laser são uma parte importante do campo da extensometria óptica, que se concentra em técnicas de medição óptica de deformação e extensão em materiais (SHARPE, 2008) . A Figura 8 ilustra um exemplo um extensômetro a laser.

Figura 8. Extensômetro laser, modelo LE-05.



Fonte: PTS-Primo Trade Solutions, (2023)

O extensômetro a laser é um instrumento de medição que utiliza um feixe de luz monocromático com comprimento de onda conhecido para medir o deslocamento de uma superfície. Quando o feixe de luz é direcionado para a superfície, ele é refletido de volta para o sistema de medição, onde é detectado e analisado. A partir do padrão de interferência obtido, é possível calcular o deslocamento ocorrido na superfície do objeto de análise. Essa técnica é especialmente útil em aplicações que exigem alta precisão e não podem ser medidas com extensômetros convencionais (ZHANG; PAN; CROSS, 2004).

### 3.2.2.3 Extensômetro vídeo

Os extensômetros de vídeo são dispositivos ópticos avançados utilizados para medir deformações superficiais em amostras de teste submetidas a cargas de tração ou compressão, processando imagens ou vídeos gravados durante o carregamento. Eles são uma alternativa atrativa aos extensômetros de contato convencionais (LIM e colaboradores, 2008), (BUTTER; OPTICS, 1978), pois permitem a medição de deformação sem contato, sem acessar ou danificar a amostra de teste. Em teoria, os extensômetros de vídeo podem ser aplicados em testes mecânicos em qualquer tipo de amostra (desde metais duros até tecidos biológicos moles) em várias condições experimentais (desde temperatura ambiente até temperaturas extremas ou mesmo em ambientes aquáticos), uma vez que sejam obtidas imagens de alta fidelidade da superfície da amostra de teste, também pode ser utilizado em diversas aplicações, tais como testes de laboratório, ensaios de materiais, monitoramento de estruturas e testes de protótipos (YIN; TOMPKINS, 1972).

Com o avanço tecnológico, o vídeo extensômetro vem ganhando cada vez mais importância na área de engenharia e ciências dos materiais, graças ao seu papel fundamental na avaliação da resistência e deformabilidade de diferentes tipos de materiais. Os resultados da medição são apresentados geralmente em forma de gráfico ou tabela, possibilitando aos engenheiros e cientistas avaliarem o comportamento mecânico do material ou estrutura em questão (GARDNER, 1969), (SUTTON e colaboradores, 2008).

Os sistemas de extensômetro de vídeo são uma tecnologia que permite a medição da deformação ou alongamento de materiais ou estruturas sob carga ou tensão. Na Engenharia Biomédica, os primeiros estudos surgiram no final da década de 1960 e início de 1970, como uma alternativa aos métodos mecânicos. Com o objetivo de tornar o processo de medição mais preciso e automatizado, pesquisadores começaram a desenvolver ferramentas que permitiam converter sinais analógicos em sinais digitais para obter medições computadorizadas (SUTTON e colaboradores, 2008).

A extensometria de vídeo é uma técnica que apresenta grande versatilidade, fornecendo uma solução de teste universal para materiais que, de outra forma, seriam difíceis de serem testados por meios convencionais. Em escala microscópica, a extensometria de vídeo através da análise de imagens de microscópio permite a

medição precisa de amostras muito pequenas, que são difíceis de serem instrumentadas (PAN; YU; WU, 2013). Além disso, a extensometria de vídeo é uma opção prática para o teste de materiais que são muito sensíveis ao instrumento, sem que isso afete as propriedades medidas (LILJENHJERTE; UPADHYAYA; KUMAR, 2016).

Os extensômetros de vídeo modernos mais simples funcionam de maneira semelhante aos extensômetros de contato tradicionais e aos primeiros sistemas de medição. Conhecidos amplamente como extensômetros de rastreamento de marcadores, esses dispositivos dependem da detecção e rastreamento de um pequeno número de marcas de alto contraste em uma amostra de teste. A distância inicial entre os marcadores define um comprimento de bitola, e a mudança nesse comprimento ao longo de um teste é utilizada para calcular a deformação. Enquanto a maioria dos primeiros sistemas de rastreamento de marcadores usava marcas adicionadas manualmente às amostras (ADDIEGO e colaboradores, 2006), sistemas mais recentes fizeram uso de pontos de referência naturais presentes na amostra para servir como pontos de medição. Isso tem sido particularmente importante em aplicações em que marcações físicas seriam inviáveis, como na medição de amostras de tração em microescala (WARDLOW, 2015).

Os extensômetros de vídeo de correlação de imagem digital 2D (2D-DIC) são considerados entre os sistemas mais avançados na literatura e são oferecidos comercialmente como uma alternativa a sistemas de rastreamento de marcas mais simples. Em uma implementação típica de 2D-DIC, uma amostra fina e plana é preparada com um padrão fosco aleatório de manchas, que são rastreadas por uma câmera enquanto a amostra se deforma. Um mapa de deslocamentos, e, portanto, deformações superficiais, pode ser calculado comparando imagens antes e depois da deformação. O 2D-DIC geralmente opera sob a suposição de que todo o movimento e deformação ocorrem no plano, sendo obtido através da utilização de amostras finas e planas colocadas perpendicularmente à câmera. O movimento fora do plano atua como uma tensão virtual, aumentando e encolhendo os padrões na superfície da amostra de uma forma indetectável pela câmera como tensões físicas. Mesmo em amostras finas e planas, é praticamente inevitável ocorrer algum grau de movimento fora do plano. Trabalhos recentes em 2D-DIC têm abordado esse problema, buscando melhorar a precisão dos resultados, especialmente na presença de estrangulamento e outras fontes de movimento significativo fora do plano (SUTTON e colaboradores, 2008).

Os dados de deformação fora do plano são utilizados para corrigir as medições de deformação no plano realizadas pelo 2D-DIC. Em um estudo recente envolvendo amostras de microtensão e microcisalhamento, o 2D-DIC foi utilizado para rastrear a mudança no comprimento padrão das amostras de teste e rastrear deformações superficiais (BAI; ZHU; HE, 2015).

Em estudos de amostras submetidas a tensão e cisalhamento, o movimento fora do plano pode afetar significativamente as medições de deformação. Para lidar com essa questão, pode-se utilizar um modelo de elemento finito, considerando o movimento fora do plano associado ao estriamento antes da fratura. Dessa forma, foi possível determinar a tensão de fratura de forma mais precisa (GORJI; MATERIALIA, 2017).

Os sistemas de correlação de imagem digital 3D (3D-DIC) funcionam de acordo com os mesmos princípios do 2D-DIC, mas utilizam duas câmeras separadas configuradas em uma configuração estereoscópica. Ao coletar imagens de duas perspectivas ligeiramente diferentes, os deslocamentos são medidos em coordenadas tridimensionais completas. O 3D-DIC é amplamente utilizado como uma ferramenta eficaz para medir amostras não planares com deformação severa fora do plano. No entanto, é importante levar em consideração que, assim como qualquer outra ferramenta, o 3D-DIC deve ser aplicado corretamente para obter resultados precisos. Por exemplo, ao estabelecer a configuração 3D-DIC, a curvatura particularmente complexa ou deformação severa pode levar a pontos cegos, onde parte da amostra fica oculta na visão de uma ou ambas as câmeras (CHEN e colaboradores, 2013).

Para resolver o problema de pontos cegos em sistemas de correlação de imagem digital 3D (3D-DIC), pesquisadores têm proposto o uso de um sistema multicâmera com seis câmeras ou mais. Ao considerar cada par de câmeras como um sistema de visão estereoscópica, cada sistema mede a sua própria visão limitada da amostra de teste e traduz os resultados para um sistema de coordenadas universal para mapear a amostra completa. Além disso, maior confiança nas medições pode ser obtida para detalhes vistos por mais de um par de câmeras. Esse método tem sido eficaz na superação dos problemas de pontos cegos encontrados em amostras com curvatura complexa ou deformação severa fora do plano (CHEN e colaboradores, 2013).

Outras abordagens para a realização de correlação de imagem digital 3D (3D-DIC) com apenas uma câmera também têm sido investigadas. O método envolve o uso de um biprisma colocado na frente de uma câmera para resolver duas

visualizações de uma amostra de teste em ângulos ligeiramente diferentes em uma imagem de saída (GENOVESE e colaboradores, 2013). A partir do rastreamento de raios, é possível encontrar a posição e orientação das duas "câmeras virtuais" associadas às duas visualizações e realizar operações 3D-DIC padrão. Sistemas semelhantes também foram propostos usando espelhos em vez de prismas para dividir a imagem (WANG e colaboradores, 2008).

Outra abordagem é um sistema de correlação de imagem digital de 360 graus para testes de materiais. (GENOVESE e colaboradores, 2016) descreve um sistema inovador de Correlação de Imagem Digital 3D (DIC) para medir a superfície total de amostras de materiais sob várias condições de carregamento com alta precisão. O sistema foi projetado para superar as limitações das máquinas universais de teste (UTM), que fornecem apenas medidas globais ou locais limitadas de deslocamento e deformação. O sistema proposto por Genovese utiliza uma única câmera digital SLR movida por várias posições ao redor da amostra através de um grande estágio de rotação e um procedimento de calibração e processamento de dados preciso. O resultado do trabalho apresentado indica que o sistema desenvolvido é robusto e preciso, demonstrando ser uma solução viável para enfrentar os desafios encontrados na área de testes de materiais.

Em busca de uma correlação tridimensional de imagem digital mais eficiente e precisa, foi desenvolvida uma estratégia para aprimorar a eficácia e exatidão da técnica conhecida como Correlação de Imagem Digital Tridimensional (DIC 3D). A técnica propõe uma busca baseada na geometria epipolar, que é a geometria da visão estéreo, para encontrar pontos correspondentes entre as imagens. Além disso, proposto por Zhong; et al, é um método para calcular a posição 3D e construir o sistema de coordenadas mundiais na superfície de teste. O método correlação de imagem digital tridimensional é aplicado para medir o perfil de um modelo que esculpe e avalia a resposta de carregamento de um corpo de prova de tração. O resultado mostra que a estratégia proposta aumenta a eficiência da busca e a precisão da medição (ZHONG; INDURKAR; QUAN, 2018).

As medições de forma e deformação em 3D de alta velocidade e quadro completo usando correlação de imagem digital estéreo e uma câmera colorida de alta velocidade, propõe-se uma técnica inovadora para medição de forma e deformação em 3D com alta velocidade e em quadro completo utilizando correlação de imagem digital estéreo (DIC estéreo) e uma única câmera colorida de alta velocidade. Com o auxílio de um dispositivo pseudo-estéreo projetado com cuidado, imagens coloridas

da superfície de um objeto de teste são capturadas usando uma câmera CMOS colorida de alta velocidade. Estas imagens podem ser separadas em sub-imagens de canais vermelho e azul através de uma técnica de correção de diafonia de cores eficaz e simples. Em seguida, essas sub-imagens são processadas pelo método convencional de DIC estéreo para obter a forma 3D em quadro completo e a deformação na superfície do objeto de teste. A técnica proposta oferece vantagens distintas em relação aos métodos existentes de DIC estéreo de alta velocidade, como a utilização de uma única câmera de alta velocidade sem comprometer a resolução espacial. Dois experimentos reais comprovam a eficácia e precisão da técnica proposta por (YU; PAN, 2017).

A correlação de imagem digital para medição de deformação de superfície: desenvolvimentos históricos, avanços recentes e objetivos futuros, apresenta uma revisão dos avanços e desenvolvimentos da técnica de correlação de imagem digital (DIC) na medição de deformação de superfície. O histórico do DIC é dividido em duas fases: fundação (1982 a 1999) e expansão (2000 até o presente), destacando marcos importantes na evolução da técnica. Além disso, avanços recentes, incluindo novos desenvolvimentos em sistemas 2D-DIC, melhorias no algoritmo de correlação e sistemas estéreo-DIC, são apresentados. É fornecido um resumo das técnicas atuais de DIC de última geração e são vislumbradas possíveis melhorias futuras e objetivos no campo (PAN, 2018).

Na medição de múltiplas propriedades mecânicas para compósitos poliméricos usando correlação de imagem digital em temperaturas elevadas, apresenta uma técnica inovadora para medir as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono em condições de altas temperaturas, utilizando a correlação de imagem digital. A técnica combina a medição da distribuição de tensão e deformação da superfície da amostra, resultando em medidas precisas do módulo de elasticidade axial e módulo de cisalhamento no plano. A experimentação foi realizada em amostras de cisalhamento de viga curta, com alta tensão de cisalhamento no plano, e a falha foi causada pela delaminação a altas temperaturas. O método utiliza aproximação fechada e atualização do modelo de elementos finitos para determinar os módulos mecânicos. A variação das propriedades mecânicas com a temperatura foi obtida simultaneamente, mostrando uma redução do módulo de cisalhamento no plano em relação ao módulo de elasticidade axial, indicando a sensibilidade à temperatura da matriz do compósito. (HAO e colaboradores, 2021).

Numa investigação experimental da falha quase estática em juntas parafusadas de alumínio composto usando a Técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC). Juntas sobrepostas formadas por dois parafusos simples de cisalhamento fabricados com fibra de carbono reforçada por polímero e placas de alumínio são submetidas a cargas de tração enquanto são monitoradas com DIC estéreo. Os deslocamentos medidos são processados por meio da remoção de outliers utilizando o teste de Grubbs, que é um teste usado para detectar valores discrepantes em um conjunto de dados univariado assumido como proveniente de uma população normalmente distribuída, e da redução de ruído explorando as simetrias da geometria do espécime. A curvatura de Gauss ao longo da fibra de carbono reforçada por polímeros é calculada a partir dos dados de deslocamento DIC, e um início súbito de curvatura nas proximidades dos parafusos é observado como precursor da falha do rolamento. Fractogramas de seções transversais parcialmente danificadas da fibra de carbono reforçada por polímeros próximas aos parafusos, confirmam o dano compressivo dos laminados como fonte dessa curvatura localizada. Concluímos que o DIC estéreo é útil como uma medição sem contato do início da falha do rolamento (WEMMING e colaboradores, 2022).

Também existe um novo sistema de extensômetro de vídeo para testar materiais submetidos a deformação plástica severa. A caracterização efetiva de materiais submetidos a deformação plástica severa requer a medição precisa das dimensões instantâneas da amostra durante o teste. Os métodos convencionais de extensometria de vídeo 2D têm limitações, como a necessidade de amostras finas e planas e a incapacidade de levar em conta a deformação fora do plano, apresentando uma nova abordagem para a extensometria de vídeo 2D, que utiliza subtração de fundo para medir o perfil completo de uma amostra cilíndrica. Os experimentos de calibração mostraram erro de 3,1% na estimativa da tensão de escoamento real e o sistema foi testado com sucesso em amostras de alumínio 2024-T351. Além disso, um modelo preliminar de elementos finitos construído com dados experimentais deu resultados promissores e corresponderam de perto aos dados experimentais (FELLING, 2018).

Um outro método descreve uma técnica de medição de deformação usando correlação de imagem digital com uma câmera não fixa. A técnica foi desenvolvida para ser mais flexível e conveniente do que o método tradicional, especialmente na medição de deformações em grandes instalações como pontes. A técnica envolve a captura de múltiplas imagens de referência e alvo, calibração da posição relativa da

câmera e amostra, e divisão da superfície da amostra em malhas para reconstrução dos padrões de manchas. A precisão do método foi testada medindo as deformações de uma placa de alumínio e comparando com valores registrados pelo testador de tração (LIANG e colaboradores, 2021).

Atualmente o extensômetro óptico de vídeo com grande campo de visão e alta precisão é uma ferramenta de medição de deformação não invasiva com vantagens de alta precisão, grande campo de visão e não-contato. Este extensômetro é composto por *hardware* integrado com baixo custo e alta qualidade de imagem, incluindo lente telecêntrica dupla, câmera com dispositivo de carga acoplada (CCD), fonte de luz circular, tripé, trilho deslizante e acessórios de suporte. O *software* de suporte é desenvolvido para calcular automaticamente dados de tensão e razão de Poisson do material. O extensômetro de vídeo óptico foi comprovado como preciso por verificação experimental, com erro máximo de tensão de cerca de  $15 \mu\epsilon$  e erro de desvio padrão de  $8,38 \mu\epsilon$ . Este extensômetro pode ser usado para medições de alta precisão de deformações em amostras de tamanho grande de diferentes tipos de materiais (SHAO e colaboradores, 2023).

### 3.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA EXTENSIOMETRIA

As propriedades mecânicas dos materiais são características que permitem diferenciar, do ponto de vista do comportamento mecânico, um material dos demais. Como cada material apresenta um comportamento distinto, a análise de suas propriedades mecânicas é realizada através de testes experimentais (ENGENHARIA, 2004).

Entre as propriedades mecânicas mais comuns medidas em materiais estão encontrar: a resistência à tração, compressão, deformação, o módulo de elasticidade (ou de Young) e razão de Poisson. Para obter essas propriedades é necessário saber o quanto o material se deforma em função da tensão a que é submetido. A forma de se obter essa deformação experimentalmente é através da extensometria. Esses resultados geralmente são mostrados na curva tensão-deformação do referido material. Este diagrama é um dos mais úteis na análise de materiais, pois nos dá informações sobre seu comportamento quando submetido a uma tensão crescente (SALMÁN, 2020).

### 3.3.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um teste mecânico amplamente utilizado para determinar as propriedades mecânicas dos materiais, como a resistência à tração, a ductilidade, a tenacidade, entre outras. O teste consiste em submeter uma amostra padronizada do material a uma carga uniaxial de tração em um equipamento específico, conhecido como máquina de ensaio de tração. Durante o teste, é medido o comportamento da amostra em relação à carga aplicada e à deformação resultante, permitindo a construção de um diagrama de tensão-deformação. A partir desse diagrama, é possível obter informações importantes sobre as propriedades mecânicas do material, como seu limite de elasticidade, resistência máxima, módulo de elasticidade, entre outros (SANTOS; SPIM, 2008).

A amostra tem dimensões padronizadas por normas específicas e serve para conhecer as características do material. As amostras padronizadas podem ser comparadas com outros materiais que também foram submetidos a este ensaio (CALLISTER, 2002).

O ensaio de tração consiste em submeter um material a uma força que tende a esticá-lo ou alongá-lo, com o objetivo de conhecer suas características. Normalmente, é realizado com amostras padronizadas para comparar resultados. Durante o ensaio, a deformação é uniformemente distribuída e pode ser medida com precisão em função da tensão aplicada. Isso permite obter informações sobre a resistência do material. Os ensaios mecânicos de materiais visam avaliar as propriedades mecânicas de um objeto ou material, simulando as condições reais de uso. Eles podem ser realizados em produtos acabados ou em corpos de prova de formas e dimensões padronizadas.

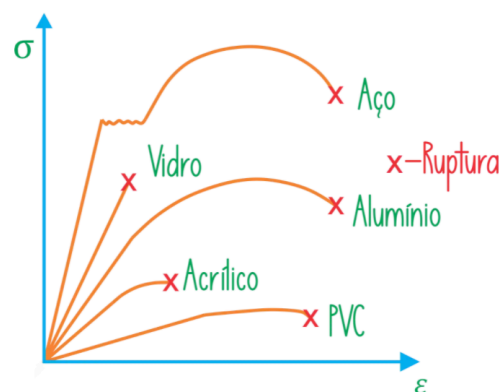
Os resultados dos ensaios podem ser susceptíveis à influência de diversos fatores, tais como o comprimento do corpo de prova, sua geometria, a velocidade de aplicação da carga e possíveis imprecisões no método de análise (SOUZA; PEREIRA, 2005).

### 3.3.2 Diagrama tensão - deformação

O diagrama tensão x deformação é uma representação gráfica da relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante em um material durante um ensaio de tração. A tensão é a força aplicada por unidade de área do material, enquanto a deformação é a medida da mudança de comprimento ou forma do material em

resposta à tensão aplicada. O diagrama tensão x deformação é obtido a partir da realização de ensaios de tração em amostras padronizadas do material em questão, onde a força aplicada é medida enquanto a deformação é registrada. Com base nesses dados, é possível construir o gráfico que representa a resposta mecânica do material à tensão aplicada. Normalmente, o diagrama apresenta uma região inicial linear, conhecida como limite de proporcionalidade, onde a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada. Em seguida, ocorre uma região de escoamento, onde a deformação aumenta consideravelmente em relação à tensão aplicada. Por fim, a curva apresenta uma região de estricção, onde ocorre uma redução na área da amostra devido à concentração das deformações em uma região localizada. A partir dessas informações, é possível avaliar as propriedades mecânicas do material, como sua resistência, ductilidade e tenacidade (CALLISTER, 2002). Figura 9, ilustra o comportamento da deformação dos materiais aplicados uma tensão.

Figura 9. Comportamento da deformação dos materiais aplicados uma tensão.



Fonte: Fernandes (2023).

### Tensão e deformação

$$\sigma = P/S_0 \quad (3.3)$$

Onde:

$\sigma$ : tensão de engenharia

P: força aplicada

$S_0$ : área inicial da seção da força

### Deformação específica

A deformação específica é uma medida da quantidade de mudança dimensional de um material ou objeto quando submetido a forças externas. É expressa como a variação do comprimento original do objeto dividido pelo seu comprimento inicial (CALLISTER, 2002):

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0 \quad (3.4)$$

Onde:

$l_0$  - Comprimento inicial

$l$  - Comprimento sob a ação da força

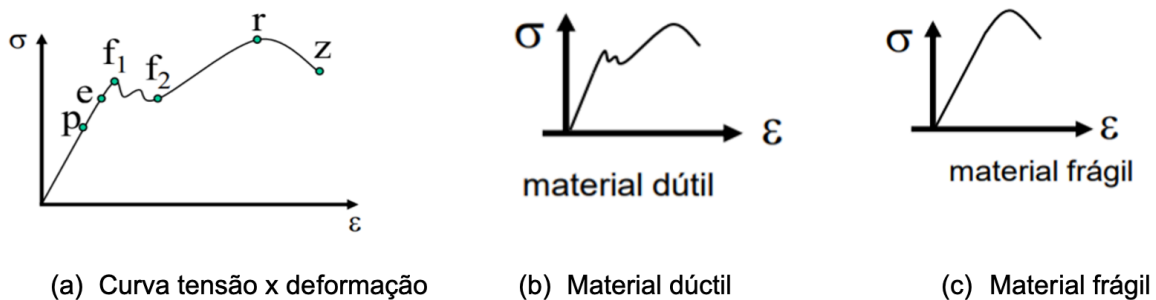
$\varepsilon$ : Deformação de engenharia =  $\Delta l / l_0$

O material frágil e dúctil apresenta fase diferentes de deformação quando submetidos a uma carga. A Figura 10 ilustra as fases de deformação dos materiais, sendo a Figura 10(a) curva de tensão x deformação, a Figura 10(b) de um material dúctil e a Figura 10(c) frágil:

**Material frágil:** Eles geralmente não sofrem deformação plástica antes de se romperem. Quando submetidos a uma carga, eles passam por uma fase de deformação elástica, seguida de uma fase de fratura. A deformação elástica é reversível, ou seja, o material retorna ao seu formato original após a carga ser removida.

**Material dúctil:** Eles são capazes de suportar uma grande quantidade de deformação plástica antes de se romperem. Eles passam por uma fase de deformação elástica, seguida de uma fase de deformação plástica, durante a qual o material sofre uma deformação permanente. Finalmente, a fase de fratura ocorre após a deformação plástica ter alcançado um determinado limite.

Figura 10. Fase de deformação do material frágil e dúctil em relação aplicada com a relação a deformação.



Fonte: Callister (2002).

Onde:

$\sigma$  - tensão

$\varepsilon$  - deformação

$e$  = fim da região elástica (limite elástico)

$p$  - fim da região linear (limite de proporcionalidade)

$f_1, f_2$  - região de escoamento

$r$  - ponto de máxima tensão (instabilidade plástica)

$z$  - ruptura

$\sigma_E$  - tensão limite de elasticidade ( $\epsilon_E = 0,03\%$ )

$\sigma_p$  - tensão limite de proporcionalidade

$\sigma_e$  - tensão de escoamento ( $f_1$  ou  $\epsilon_E = 0,2\%$ )

$\sigma_R$  - tensão de ruptura NB. Se  $\sigma_{adm} = \sigma_R$  material pode entrar no regime plástico

O ensaio de ruptura à tração é uma técnica de teste de materiais utilizada para determinar a resistência mecânica de um material à tensão. Nesse ensaio, o material é submetido a uma força de tração crescente até que ele rompa.

Um gráfico de resultados de um ensaio de ruptura à tração geralmente inclui as seguintes etapas:

- **Deformação elástica:** a primeira etapa do gráfico, durante a qual o material sofre uma deformação elástica reversível.

- **Início da deformação plástica:** o ponto em que o material começa a sofrer uma deformação plástica permanente.

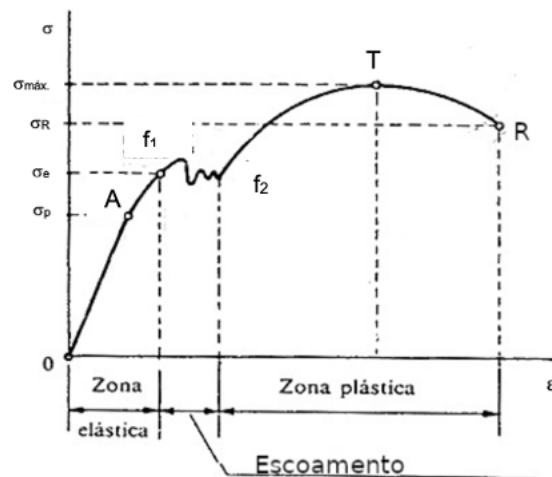
- **Zona de escoamento:** a região do gráfico durante a qual o material sofre uma deformação plástica contínua.

- **Ponto de ruptura:** o ponto em que o material quebra.

- **Resistência à tração:** a força máxima aplicada ao material antes de sua quebra.

Estas etapas são geralmente representadas no gráfico como uma linha que mostra a variação da força aplicada em relação à deformação do material. A Figura 11 ilustra as etapas de ruptura dos materiais no ensaio de tração, elencando cada parte do gráfico.

Figura 11. Etapas de ruptura dos materiais no ensaio de tração.



Fonte: Callister (2002).

Onde:

OA – Região de comportamento elástico,

AR – Região de comportamento plástico,

A – Ponto de escoamento,

T – Ponto de tensão máxima,

R – Ponto de ruptura,

$\sigma_{máx.}$  - Limite de resistência do material [Mpa] ou [N/mm<sup>2</sup>],

$\sigma_R$  - Limite de ruptura do material [Mpa] ou [N/mm<sup>2</sup>],

$\sigma_e$  - Limite de escoamento [Mpa] ou [N/mm<sup>2</sup>],

$\sigma_p$  - Limite de proporcionalidade [Mpa] ou [N/mm<sup>2</sup>].

### 3.3.3 Módulo Young ou elasticidade

A Lei de Hooke é uma lei fundamental da mecânica que estabelece a relação linear entre a tensão aplicada a um material e a deformação que ocorre em resposta a essa tensão, ou seja, a Lei de Hooke afirma que a tensão e a deformação são proporcionais no regime elástico. O módulo elástico é um parâmetro que descreve a rigidez de um material e é definido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante. Em outras palavras, o módulo elástico é a inclinação da linha de relação linear entre tensão e deformação no regime elástico. A importância dos módulos elásticos na bioengenharia e aplicação de biomateriais decorre do fato de que eles estão relacionados a muitas outras propriedades mecânicas importantes, como a tensão de escoamento e a tensão de ruptura. Além disso, a maioria dos materiais utilizados na fabricação de implantes seguem a Lei de Hooke, o que significa que a tensão e a deformação são proporcionais no regime elástico. Por isso, o

conhecimento do módulo elástico é fundamental para o desenho de implantes eficazes e seguros (SOUZA, 2010).

O módulo elástico, também conhecido como módulo de Young (ou uniaxial), é uma medida da rigidez de um material quando submetido a um esforço. Ele é definido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante e é uma propriedade intrínseca dos materiais. A rigidez de um material é influenciada por sua composição química, microestrutura e presença de defeitos como poros. Portanto, o módulo elástico é uma medida importante para entender as propriedades mecânicas de um material e sua capacidade de suportar cargas. Conseqüentemente, o módulo elástico é uma grandeza fundamental para a descrição da relação entre tensão e deformação no regime elástico e para a compreensão da rigidez dos materiais, assim como de grande importância para aplicações em diversas áreas, incluindo a bioengenharia e a fabricação de implantes, onde a rigidez adequada é crucial para o sucesso e a segurança dos dispositivos (SOUZA, 2010).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

Onde

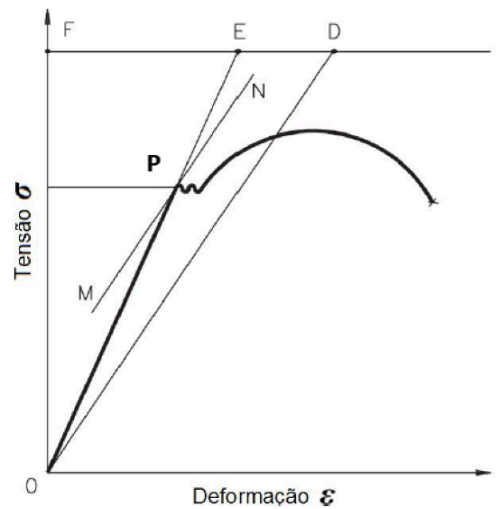
E = Módulo de Young;

$\sigma$  = Tensão;

$\varepsilon$  = Deformação

O módulo de Young é calculado a partir da análise de uma curva obtida a partir de um teste físico de tensão e deformação, utilizando-se a equação 3.5. Em materiais ideais puramente elásticos, segundo a lei de Hooke, a tensão e deformação seriam infinitas, mas em materiais reais existe um limite elástico, que é o valor máximo da tensão para que o material se comporte elasticamente. A curva é considerada elástica até o limite de elasticidade, equação. O ensaio físico utilizado para se conhecer o fim da zona elástica do biomaterial é baseada no método de Johnson, que consiste na determinação do ponto "P" na curva tensão-deformação, ou o limite elástico aparente ou limite Johnson este ponto "P" é a tensão em que a velocidade de deformação é 50% maior que a origem e a inclinação da tangente à curva é 50% menor que a inclinação da reta inicial. A análise compara o ângulo atual com o ângulo do próximo segmento de curva, e o ponto em que há alteração define o limite de elasticidade (SOUZA, 2010). A Figura 12, ilustra o ponto em que o ângulo se altera define o limite de elasticidade.

Figura 12. Ponto "P" em que o ângulo se altera define o limite de elasticidade.

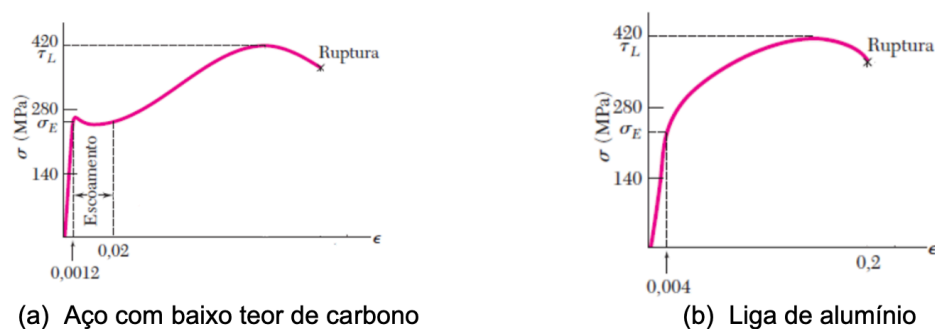


Fonte: Souza (2010).

### 3.3.4 Limite de escoamento

O limite de escoamento é o ponto máximo na curva tensão-deformação em que o material passa do regime elástico para o regime plástico, ou seja, ocorre uma deformação relativamente grande acompanhada por uma pequena variação na tensão. A deformação padrão para o limite de escoamento é conhecida como "limite n de escoamento" e pode variar dependendo do campo plástico do material (BEER e colaboradores, 2011). A Figura 13(a) com baixo teor de carbono e 13(b) em liga de alumínio, ilustra curva característica do limite de escoamento e a Tabela 2 o limite n de escoamento para metais.

Figura 13. Curva característica do limite de escoamento.



(a) Aço com baixo teor de carbono

(b) Liga de alumínio

Fonte: Berr e colaboradores (2011).

Para materiais dúcteis, o início do escoamento é caracterizado por uma tensão crescente até o limite de resistência, seguido por uma estricção que leva à ruptura. A resistência ao escoamento  $\sigma_e$  pode ser determinada pelo método do desvio, que envolve a medida da tensão aplicada e a deformação resultante.

Tabela 2. Limite n de escoamento para metais.

Tipo de material	Desvio n
Ligas metálicas muito duras	n=0,1% ( $\epsilon = 0,001$ )
Metais e ligas em geral	n=0,2% ( $\epsilon = 0,002$ )
Cobre e suas ligas	n=0,5% ( $\epsilon = 0,005$ )

Fonte: Adaptado de (SANTOS; SPIN, 2008)

### 3.3.5 Limite de resistência

O limite de resistência é a tensão máxima alcançada durante o ensaio de tração e é amplamente utilizado na especificação de materiais e na realização de cálculos para avaliar sua resistência mecânica. Além disso, é considerado um dos indicadores mais precisos para se determinar a resistência de um material (BEER e colaboradores, 2011).

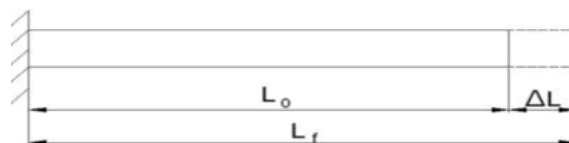
O encruamento é uma das consequências do escoamento em materiais dúcteis e pode resultar em um aumento da tensão até o ponto máximo, ou limite de resistência. No entanto, o limite de escoamento é considerado mais importante para projetos envolvendo materiais dúcteis, pois descreve a faixa de deformação plástica antes da ruptura. Já para metais frágeis, o limite de resistência é mais relevante, pois é a tensão máxima que o material pode suportar antes de quebrar sem deformação plástica significativa (BEER e colaboradores, 2011).

A tenacidade de fratura mede a capacidade de um material resistir à fratura quando submetido a uma tensão. A resistência à fadiga avalia a capacidade de um material suportar cargas alternadas de tração e compressão. A resistência ao impacto mede a capacidade de um material resistir à deformação a altas velocidades. A dureza do material mede a resistência à penetração. Polímeros como o LDPE (polímeros de baixa densidade) apresentam boa resistência ao impacto, enquanto cerâmicas tendem a ser frágeis e metais são materiais tenazes. Materiais poliméricos são menos duros que cerâmicos, vítreos e metálicos (MANO, 2002).

A deformação pode ser descrita como permanente ou elástica, dependendo da capacidade do material de retornar a sua forma original após a remoção da força. A deformação elástica ocorre quando o material volta a sua forma original após a remoção da força, enquanto a deformação permanente ocorre quando a forma do material é alterada de forma permanente após a remoção da força. É importante lembrar que a quantidade de deformação que um material é capaz de suportar depende de sua força e tenacidade (HIBBELER, 2006).

A deformação normal média é uma medida quantitativa da deformação e é expressa como a variação do comprimento de um elemento por unidade de comprimento. É importante conhecer as propriedades de deformação de um material para otimizar o projeto de componentes e garantir o desempenho adequado sem ocorrência de fratura ou deformação excessiva. A Figura 14, ilustra a deformação normal média.

Figura 14. Deformação normal média.



Fonte: Hibbeler (2006).

A deformação uniaxial ( $\epsilon \rightarrow$ ) é uma medida da mudança no comprimento de um material em relação ao seu comprimento original e é calculada como a razão da variação do comprimento ao comprimento inicial. Ela é um indicador importante da resposta mecânica do material a uma carga aplicada, como ilustra a equação 3.6 abaixo.

$$\epsilon \rightarrow = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.6)$$

Onde:

$\Delta L$  - é a variação do comprimento do elemento;

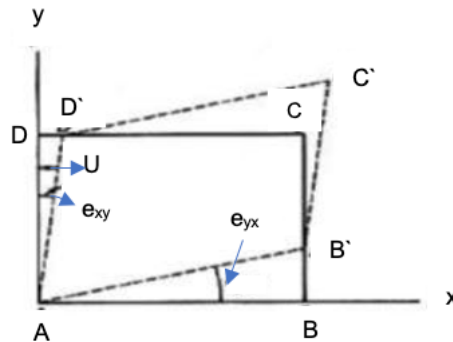
$L_f$  - variação entre o comprimento final ( $L_f$ );

$L_0$  - comprimento inicial.

A deformação cisalhante, também conhecida como corte ou shear, ocorre quando há uma aplicação de forças de cisalhamento em um material. Isso resulta em uma mudança na forma do material, mas sem alterar o seu volume. É importante considerar a deformação cisalhante em projetos de engenharia para garantir o

desempenho adequado do componente (HIBBELER, 2006). A Figura 15 ilustra a deformação cisalhante.

Figura 15. Deformação cisalhante.



Fonte: Hibbeler (2006).

O ensaio de tração é feito por meio da aplicação de forças axiais a uma barra cilíndrica ou retangular e sua deformação é medida. A partir dos resultados, pode-se obter informações sobre o limite de escoamento, o módulo de elasticidade, a ductilidade e a resistência à fratura do material (HIBBELER, 2006).

### 3.3.6 Aprendizado

Com o intuito de aprimorar continuamente os resultados de simulações futuras, o programa utiliza todas as análises conduzidas em materiais reais para criar um banco de dados. Esse repositório compreende experiências e recálculos de curvas, permitindo a definição do resultado dos ensaios de tração como uma função de variáveis independentes. A equação que representa a relação entre a tensão aplicada ( $\sigma$ ) e a deformação resultante ( $\epsilon$ ) é fundamental para o ensaio de tração, conforme exemplificado na equação 3.7 abaixo (BROGGIO, 2022).

$$\epsilon = G(\sigma) \quad (3.7)$$

A função G é uma representação matemática que estabelece uma relação entre a entrada  $\sigma$  e a saída  $\epsilon$ , sendo um sistema definido como um modelo matemático que correlaciona o sinal de entrada com o sinal de saída. Em termos matemáticos, G pode ser descrito como um sistema que vincula a tensão aplicada ( $\sigma$ ) com a deformação ( $\epsilon$ ). É viável separar os sinais combinados no sistema previamente, destacando as regiões elástica e plástica, com ênfase na estimativa de um ou mais parâmetros relacionados a essa última característica (BROGGIO, 2022).

Se a função  $G$  já atende ao princípio da superposição, isto é, se a resposta do sistema à entrada combinada é igual à soma das respostas individuais das entradas separadas, podemos então utilizar essa propriedade para analisar distintamente as regiões elástica e plástica. Tal abordagem nos possibilita estimar um ou mais parâmetros específicos relacionados à característica plástica do material, como é exemplificado na equação 3.8 abaixo.

$$G\{\alpha_1\sigma_1 + \alpha_2\sigma_2\} = \alpha_1\varepsilon_1 + \alpha_2\varepsilon_2 \quad (3.8)$$

Nesta análise, consideramos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  como escalares arbitrários. Sob a premissa de que  $G$  é uma função linear, o sistema por ela representado também é linear. Além disso, faz-se necessário examinar o sistema em termos de seu comportamento temporal. Ao aplicarmos um deslocamento (atraso ou avanço) no tempo do sinal de entrada e avaliarmos se isso resulta no mesmo deslocamento no sinal de saída, podemos caracterizar o sistema como invariante no tempo, conforme exemplificado na equação 3.9 abaixo (BROGGIO, 2022).

$$G\{\sigma_{(t-t_0)}\} = \varepsilon_{(t-t_0)}, \quad \forall t_0 \in Z \quad (3.9)$$

O sistema representado pela função  $G$  satisfaz ambas as propriedades: linearidade e invariância no tempo. Portanto, ele é classificado como um Sistema Linear Invariante no Tempo (SLIT), um SLIT pode exibir repetibilidade constante, o que o torna um sistema periódico no tempo. Essa periodicidade pode ser representada pela série de Fourier como mostrado na equação 3.10, ou por meio do polinômio trigonométrico equivalente definido por  $p_n = p_n(x)$ , onde  $n$  é a ordem do polinômio. Esse polinômio representa uma função periódica de período  $2\pi$ , conforme descrito na equação 3.11 (BROGGIO, 2022).

$$f\{x\} = a_0 + a_1\text{sen}(x) + a_2\text{sen}(2x) + a_3\text{sen}(3x) + \dots + b_1\text{cos}(x) + b_2\text{cos}(2x) + b_3\text{cos}(2x) \quad (3.10)$$

$$p_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k\text{cos}(kx) + b_k\text{sen}(kx)] \quad (3.11)$$

Para que uma função  $f$  possa ser expressa por uma Série de Fourier, é necessário que ela seja periódica e seccionalmente diferenciável. A condição de ser seccionalmente diferenciável é suficiente, embora não essencial, para que  $f$  possa ser expandida em uma Série de Fourier. Em termos mais específicos, toda função que é periódica e seccionalmente contínua pode ser representada por uma Série de Fourier, mas também existem funções que podem ser expressas por uma Série de Fourier, mesmo que não sejam seccionalmente contínuas (BROGGIO, 2022). Dessa forma, a função  $G$  pode ser representada na forma de um polinômio, como indicado pela equação 3.12 abaixo.

$$G_{(\sigma_i)} = \varepsilon_i \quad (3.12)$$

A função  $G$  é responsável por fornecer a curva de tensão aplicada ( $\sigma$ ) e deformação ( $\varepsilon$ ). Suponha que o arquivo do ensaio físico nos forneça  $N$  valores. Desejamos encontrar os coeficientes  $\alpha$  do polinômio para reconstruir a curva, considerando pontos igualmente espaçados de  $\varepsilon_1$  até  $\varepsilon_n$  e  $\sigma_1$  até  $\sigma_n$ , onde  $\sigma_n - \sigma_1 = h$ . Para isso, utilizamos a equação 3.13, abaixo.

$$p(x) = \alpha_0 + \alpha_1\sigma + \alpha_2\sigma^2 + \dots + \alpha_{N-1}\sigma^{N-1} \quad (3.13)$$

Para transcrever o polinômio para uma forma matricial, considerando a equação 3.14, temos:

$$V_N A = \varepsilon \quad (3.14)$$

Onde:

$$A = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{N-1}\}$$

$$\varepsilon = \{\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{N-1}\}$$

$$V_N = \text{Matriz de Vandermonde}$$

A matriz de Vandermonde (HAMILTON, 1920), em função da tensão, pode ser representada pela equação 3.15, como segue:

$$(V_N)_{ij} = \sigma_i^{j-1} \quad (3.15)$$

$$\text{Observando que } (ij = 1, 2, \dots, N) \quad (3.16)$$

Ao mudarmos a origem e a escala, podemos definir uma nova variável  $S$ , de acordo com a equação 3.17 abaixo.

$$S = \frac{(\sigma - \sigma_1)}{(\sigma_N - \sigma_1)} \quad (3.17)$$

Podemos simplificar a fórmula da matriz conforme a equação 3.18, abaixo.

$$(V_N)_{ij} = S_i^{j-1} = \left[ \frac{i-1}{N-1} \right]^{j-1} \quad (3.18)$$

Observando que ( $ij = 1, 2, \dots, N$ )

A matriz dos coeficientes desconhecidos, denotada por A, pode ser escrita conforme a equação 3.19, abaixo.

$$A = V_N^{-1} \in \quad (3.19)$$

Onde:

$$A = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{N-1}\}$$

$$\in = \{\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{N-1}\}$$

$$V_N^{-1} = \text{Matriz inversa de Valdermonde.}$$

Para determinar os valores dos coeficientes do polinômio, optamos por uma ordem  $N = 20$  para o polinômio. Em seguida, calculamos a matriz A contendo os coeficientes do polinômio. Esses coeficientes serão aplicados em simulações futuras, utilizando os parâmetros adquiridos nesta análise. Durante a simulação, o programa busca o arquivo de aprendizado específico vinculado ao material do ensaio. Se for o primeiro ensaio com esse material, o programa cria um novo arquivo de aprendizado. Caso contrário, o programa registra os coeficientes do polinômio e os valores calculados da curva no arquivo de aprendizado existente, garantindo a exclusão de valores duplicados. O arquivo de aprendizado segue uma convenção de nomenclatura, incorporando apenas a parte descritiva do nome do arquivo com os valores do ensaio físico. Essa padronização permite uma identificação clara e organizada das informações associadas a cada ensaio específico (BROGGIO, 2022).

### 3.3.7 Curva teórica

Os resultados dos ensaios de caracterização de biomateriais são influenciados por inúmeras variáveis, como variações na composição química, estrutura molecular, temperatura e velocidade de ensaio, que podem afetar a curva de características do

material. Além disso, mesmo ensaios realizados no mesmo equipamento e com o mesmo procedimento podem produzir resultados variados. Porém, o sistema de análise permite ajustar os parâmetros manualmente ou com base em resultados obtidos em ensaios, o que garante uma precisão maior na fase elástica dos materiais que seguem a lei de Hooke (HIBBELER, 2006).

### **3.3.8 Sinal no tempo discreto**

No tempo discreto, o sinal é composto por amostras obtidas a intervalos regulares de tempo, essas amostras são usadas para representar o sinal ao longo do tempo. O período de amostragem é importante porque afeta a resolução temporal do sinal e a capacidade de capturar variações rápidas. Se o período de amostragem é muito grande, algumas informações importantes podem ser perdidas, enquanto se o período de amostragem é muito pequeno, o sinal pode se tornar muito grande e difícil de tratar. Portanto, é importante escolher o período de amostragem adequado para a análise dos sinais em tempo discreto (BEER e colaboradores, 2006).

## **3.4 NÍVEL MATURIDADE TECNOLÓGICA (TRL/MRL)**

A metodologia TRL/MRL (*Technology Readiness Level*) é um sistema utilizado para avaliar a maturidade tecnológica de um determinado produto ou tecnologia. Ela foi desenvolvida pela NASA na década de 1970 para avaliar a prontidão das tecnologias que seriam utilizadas em missões espaciais. A metodologia TRL/MRL consiste em uma escala de nove níveis numerados de 1 a 9, que representam diferentes estágios de desenvolvimento tecnológico. Cada nível possui critérios específicos para avaliar o nível de maturidade da tecnologia (NOLTE, 2011). A Figura 16, representa as fases do nível de maturidade tecnológica.

Figura 16. Representa as fases do nível de maturidade tecnológica.



Fonte: Mankins (1995).

Visando trazer as definições originais de Mankins (1995) sobre os nove níveis do TRL/MRL ligado ao desenvolvimento de tecnologia espacial. A Tabela 3, traz uma definição dos níveis de maturidade tecnológica para desenvolvimento de novos produtos.

Tabela 3. Definição dos níveis de maturidade tecnológica (TRL/MRL).

TRL	Definição	Estágio do Desenvolvimento	
1	Princípios básicos observados e relatados	Modelos teóricos	Prova de conceito
2	Conceito e/ou aplicação tecnológica formulados		
3	Prova de conceito experimental	Ensaio laboratoriais	Protótipos
4	Tecnologia validada em ambiente de laboratório		
5	Tecnologia validada em ambiente relevante	Escala piloto	Protótipos
6	Sistema/modelo do subsistema demonstrado em ambiente relevante		
7	Sistema/modelo do subsistema demonstrado em ambiente operacional	Escala final/completa	Mercado
8	Sistema/modelo completo e qualificado em ambiente operacional		
9	Sistema real comprovado em ambiente operacional		

Fonte: adaptado de Mankins (1995).

A utilização da metodologia TRL/MLR permite que os desenvolvedores de tecnologia identifiquem quais são os principais riscos tecnológicos envolvidos em cada fase de desenvolvimento, possibilitando a tomada de decisões mais informadas em relação ao investimento em pesquisa e desenvolvimento. Dessa forma, a metodologia TRL/MLR pode ser utilizada para reduzir os riscos associados ao desenvolvimento de novas tecnologias e aumentar a probabilidade de sucesso de um projeto (MANKINS, 1995).

Os Níveis de Preparação Tecnológica (TRL/MRL) são uma escala que mede o estágio de desenvolvimento de uma tecnologia. No TRL/MLR 1, a pesquisa científica está começando e os resultados orientam futuras pesquisas e desenvolvimento. O

TRL/MLR 2 ocorre após o estudo dos princípios básicos e a possibilidade de aplicações práticas. O TRL/MLR 3 envolve estudos analíticos e laboratoriais para verificar a viabilidade da tecnologia, muitas vezes com um modelo de prova de conceito. No TRL/MLR 4, componentes são testados entre si, enquanto o TRL/MLR 5 exige testes mais rigorosos em ambientes próximos à realidade. O TRL/MLR 6 apresenta um protótipo funcional ou modelo representativo, o TRL/MLR 7 demonstra o modelo em ambiente espacial, e o TRL/MLR 8 é qualificado e pronto para implementação. Uma tecnologia TRL/MLR 9 é aquela comprovada em missão bem-sucedida (NASA, 2023).

### 3.5 APLICAÇÃO DO VÍDEO EXTENSOMETRO NA ENGENHARIA BIOMÉDICA

A Engenharia Biomédica emergiu como uma especialidade crucial, moldada por engenheiros dedicados e impulsionada pela evolução das indústrias médico-hospitalar, odontológica e farmacêutica (ANTONIO, 2004); representando a convergência entre ciência e tecnologia, aplicando os princípios e métodos da engenharia para compreender, definir e solucionar problemas em biologia e medicina, tendo como principal meta o desenvolvimento de equipamentos e técnicas destinados ao diagnóstico, monitoramento e terapia (CUNHA e colaboradores, 2004). Esses visionários não apenas catalisaram o desenvolvimento de um mercado voltado para produtos de alta tecnologia, mas também perceberam o potencial dos métodos de engenharia na criação de soluções abrangentes para a medicina e todas as disciplinas das bio-ciências (ANTONIO, 2004).

Portanto a Engenharia Biomédica também representa um setor interdisciplinar que abrange estudos nas áreas de Ciências Exatas, Ciências Médicas e Biológicas, além de Engenharias (PEB UFRJ, 2011). Dentro das diversas áreas de atuação do engenheiro biomédico, destaca-se a Instrumentação Biomédica, que engloba o estudo da eletrônica, circuitos elétricos de potência, processamento analógico e digital de sinais, entre outros. Por meio desse conhecimento abrangente, é possível conceber soluções de hardware e software para aplicações biomédicas, exemplificadas pelos avanços em sensores (CUNHA e colaboradores, 2004). Sendo assim a natureza multidisciplinar da engenharia biomédica desempenha um papel fundamental nas ciências biomédicas, aplicando tecnologia a questões médicas de maneira inovadora. Essa abordagem abrangente abarca áreas como fisiologia, biomatemática e

informática médica, destacando a complexidade. Dada a amplitude do conhecimento necessário, a engenharia biomédica se divide em quatro áreas distintas: Engenharia de Reabilitação, Engenharia Médica, Engenharia Clínica ou Hospitalar e Bioengenharia (ANTONIO, 2004). Seu propósito central é aprimorar a prevenção, diagnóstico e tratamento de doenças, destacando-se pela busca incessante no desenvolvimento de técnicas inovadoras em criar equipamentos e próteses, visando elevar significativamente a qualidade de vida das pessoas (PEB UFRJ, 2011).

O vídeo extensômetro é uma ferramenta que pode ser utilizada na engenharia biomédica para medir e analisar deformações ou deslocamentos em objetos, incluindo tecidos biológicos ou materiais biomédicos.

### **3.5.1 Engenharia de reabilitação**

A engenharia de reabilitação é uma subdivisão da engenharia biomédica que aplica métodos da engenharia e ciências exatas no projeto e construção de sistemas, equipamentos e dispositivos. Seu foco inclui processamento de sinais biológicos, estimulação neuro-muscular, sustentação, locomoção, fisioterapia e próteses artificiais, visando a recuperação ou minimização dos efeitos de deficiências neurológicas e músculo-esqueléticas (ANTONIO, 2004).

A Engenharia de Reabilitação, como uma subárea da Engenharia Biomédica, desempenha um papel crucial ao aplicar o conceito de Tecnologias Assistivas, contribuindo significativamente para o avanço de tecnologias destinadas à reabilitação e/ou apoio de pessoas com deficiência física, visual, auditiva, mental, entre outras, decorrentes de traumas ou diversas condições médicas, assim como para o suporte à população idosa (PPGEB UFU, 2020).

Inúmeras possibilidades se apresentam para a aplicação de órteses e próteses em diversas áreas, tais como medicina, fisioterapia e odontologia, evidenciando um crescimento notável e contínuo nessas esferas. Exemplificando a presença dessas tecnologias no cotidiano, destacam-se órteses e próteses dentárias, lentes de contato, próteses oculares substitutivas, aparelhos auditivos, próteses de ouvido médio, implantes cocleares, válvulas cardíacas artificiais, marcapassos, parafusos, placas e hastes ortopédicas, fixação vertebral, reconstrução craniana, entre milhares de outras aplicações (MACHADO, 2018).

Na área de reabilitação, especificamente no desenvolvimento de próteses e órteses, uma das primeiras e notáveis aplicações da manufatura aditiva na engenharia

biomédica concentra-se na criação de dispositivos personalizados. As próteses, que substituem parcial ou totalmente a função de um membro perdido, e as órteses, destinadas a corrigir ou imobilizar uma estrutura do corpo, têm encontrado na manufatura aditiva, através do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) em última análise, resultando em objetos reais mais adaptados às necessidades individuais (KUNKEL e colaboradores, 2020).

O cerne desses estudos reside no compromisso de possibilitar que indivíduos com perda de funções motoras possam restaurá-las, promovendo, assim, o tratamento das limitações físicas. As aplicações práticas da Engenharia de Reabilitação abrangem diversas ferramentas, incluindo robótica, jogos, equipamentos de avaliação médica, e realidade virtual, entre outras inovações. O propósito último é não apenas enfrentar desafios físicos específicos, mas também proporcionar soluções que melhorem a qualidade de vida e a autonomia das pessoas afetadas (PPGEB UFU, 2020). No desenvolvimento de dispositivos médicos, o vídeo extensômetro pode ser empregado para avaliar e validar a performance mecânica desses dispositivos, permitindo a medição precisa das deformações sob diferentes condições de carga, contribuindo para a otimização e validação desses biomateriais (ANTONIO, 2004).

### **3.5.2 Engenharia médica**

A Engenharia Médica é um campo interdisciplinar que aplica os princípios e métodos da engenharia para solucionar problemas na área da medicina e cuidados de saúde (SALTZMAN, 2009); é uma área ampla que abrange o desenvolvimento e aplicação de tecnologias e dispositivos médicos (PRINCE; LINKS, 2006); emprega métodos da engenharia e ciências exatas na concepção, construção, operação e manutenção de equipamentos informatizados e programas destinados a diversas áreas da saúde. Seu foco central está na informática e informatização, com o objetivo de pesquisar e desenvolver aplicações específicas nos domínios da medicina, odontologia, veterinária, farmácia, bioquímica e em outras disciplinas relacionadas à saúde (ANTONIO, 2004).

Esse campo combina conhecimentos de engenharia com a biologia e a medicina para desenvolver tecnologias, dispositivos médicos e sistemas que contribuam para o diagnóstico, tratamento e monitoramento de pacientes (SALTZMAN, 2009).

Os engenheiros médicos trabalham no design, fabricação e manutenção de equipamentos médicos, como dispositivos de diagnóstico por imagem, equipamentos cirúrgicos, próteses, eletrocardiogramas, entre outros (PRINCE; LINKS, 2006).

A tecnologia do vídeo extensômetro, por exemplo, destaca-se como uma ferramenta aplicável no desenvolvimento de próteses personalizadas, promovendo uma adaptação mais precisa ao corpo do paciente e aprimorando tanto no conforto quanto na eficácia desses dispositivos (ANTONIO, 2004).

### **3.5.3 Engenharia clínica ou hospitalar**

Ao longo da história, a Engenharia Hospitalar ou Clínica tem desempenhado um papel fundamental na asseguarção da adequação e atualização das instalações de saúde, sendo essencial na concepção e operação de infraestruturas médicas complexas. A constante evolução tecnológica no âmbito da saúde tem contribuído significativamente para aprimorar procedimentos e diagnósticos. Contudo, o crescente número de equipamentos demanda uma manutenção especializada para garantir a segurança dos usuários (BRONZINO, 2017).

A Engenharia Hospitalar desempenha um papel central no gerenciamento de todas as instalações hospitalares, garantindo o funcionamento contínuo da instituição e de seus equipamentos. Dessa forma, os profissionais dessa área estão interligados em diversas atividades executadas, incluindo o gerenciamento de manutenções e riscos tecnológicos, a avaliação tecnológica, a participação em projetos de instalações hospitalares, a asseguarção da qualidade nos treinamentos, bem como a realização de manutenção corretiva e preventiva, entre outras responsabilidades (ANVISA, 2000).

A Engenharia Hospitalar tem como objetivo estabelecer e manter a infraestrutura necessária para garantir a operação eficiente de sistemas médicos. Nesse contexto, o vídeo extensômetro desempenha um papel crucial, monitorando deformações em equipamentos médicos críticos, como macas e mesas cirúrgicas. Sua aplicação abrange desde a detecção precoce de desgastes, contribuindo para a manutenção preventiva, até a validação da integridade mecânica de dispositivos médicos, assegurando conformidade com normas de segurança. (ANTONIO, 2004).

As tecnologias na área da medicina abrangem o conjunto de maquinário e equipamentos empregados para auxiliar no atendimento ao paciente, possibilitando diagnósticos de maneira fácil, rápida e precisa (FERNANDES e colaboradores, 2011).

A Engenharia Hospitalar demanda extrema atenção devido à periculosidade dos instrumentos utilizados, que frequentemente contêm uma variedade de gases. Além disso, envolve o monitoramento dos pacientes e a gestão de espaços expostos a diversos agentes microscópicos prejudiciais à vida humana. O local de trabalho desses profissionais é considerado complexo, insalubre e apresenta um maior risco de exposição ocupacional a agentes biológicos (ELIAS; NAVARRO, 2006).

O vídeo extensômetro monitora a deformação de dispositivos médicos e cirúrgicos, garantindo segurança, precisão e durabilidade. Em ambientes de treinamento médico, o vídeo extensômetro é utilizado em simulações realísticas, preparando profissionais para situações reais e promovendo o uso seguro e eficaz de equipamentos médicos. Essas aplicações desempenham um papel fundamental na segurança, eficácia e durabilidade dos dispositivos médicos, facilitando o monitoramento e a manutenção eficiente em ambientes hospitalares (ANTONIO, 2004).

#### **3.5.4 Bioengenharia**

A bioengenharia, uma subdivisão da engenharia biomédica, que emprega técnicas e métodos da engenharia e ciências exatas no desenvolvimento de órgãos internos artificiais e dispositivos auxiliares dos sistemas biológicos (ANTONIO, 2004), representando um campo interdisciplinar que combina princípios e técnicas da engenharia, ciências biológicas e medicina, visando criar soluções inovadoras e avançadas para desafios relacionados à saúde humana. Compreendendo uma vasta gama de aplicações, essa área abrange desde o desenvolvimento de dispositivos médicos até a concepção de tecnologias para diagnóstico e monitoramento de doenças (BRONZINO, 1995). Embora a micro e nanotecnologia ofereçam inúmeras oportunidades para impulsionar a medicina e engenharia biomédica, enfrentamos desafios que requerem abordagens estratégicas e colaborativas para superar essas barreiras e integradas para maximizar os benefícios das inovações na área biomédica (ANGILÓ e colaboradores, 2001). Essa abordagem avançada possibilita a substituição ou reparação de diversas partes do corpo por meio de materiais inovadores. Isso abrange uma ampla gama de implantes e próteses, oferecendo

soluções para a substituição de partes do corpo, também desempenham um papel crucial na restauração da funcionalidade e na promoção do bem-estar geral dos indivíduos (ANTONIO, 2004). A promoção de inovações na indústria de equipamentos médicos e biomédicos representa um empreendimento altamente complexo e interdisciplinar, exigindo uma abordagem colaborativa entre especialistas de diversas áreas (ALBUQUERQUE, 2004).

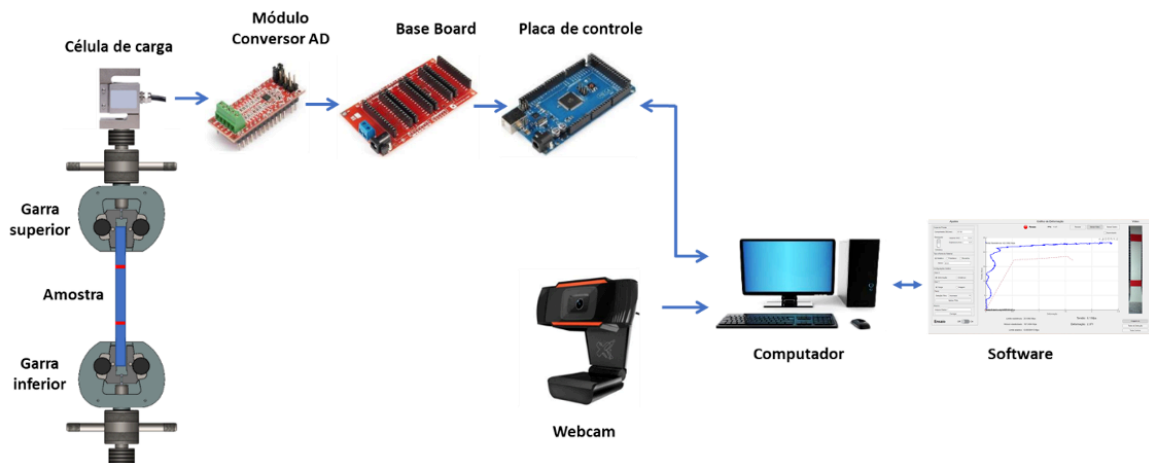
O vídeo extensômetro emerge como uma ferramenta valiosa, utilizada em estudos para validar e aplicar as propriedades mecânicas de tecidos biológicos, como músculos, ossos ou ligamentos, desempenhando um papel crucial na melhoria e prolongamento da qualidade de vida humana (ANTONIO, 2004).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 VÍDEO EXTENSOMETRO (*HARDWARE*)

Os materiais utilizados para montagem do vídeo extensômetros foram uma célula de carga, um módulo conversor AD, uma base board, uma placa de controle, câmera e computador, conforme as descrições estão abaixo. A Figura 17 apresenta uma visão geral do vídeo extensômetro desenvolvido.

Figura 17. Desenho esquemático do vídeo extensômetro de baixo custo.



Fonte: Autoria própria.

A célula de carga utilizada foi a CS200, que possui uma capacidade nominal de 2 kN e uma sensibilidade de  $2\text{mV/V} \pm 0,1\%$ , com um erro máximo de  $0,01\%$  e um sistema de trabalho de tração, esse modelo apresenta um grau de confiabilidade extremamente satisfatório e está ilustrado na Figura 18(a) detalhe do modelo utilizado e a Figura 18(b) detalhe fixação célula de carga na garra.

Figura 18. Célula de carga com capacidade de 2kN.



(a) Lider balanças, (2023)

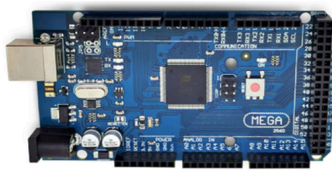


(b) Autoria própria

Fonte: Autoria própria.

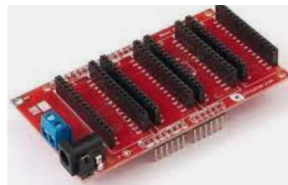
Um conjunto de componentes eletrônicos composto pela Figura 19 (a) uma placa de controle (modelo MEGA 2560), a Figura 19 (b) uma Base Board v1.0 e a Figura 19 (c) por um módulo Load Cell v1.0, conectados a uma célula de carga. O circuito montado com esses componentes é responsável pela aquisição e armazenamento dos dados de força durante o ensaio. A Figura 19, ilustra os componentes eletrônicos dispostos para a montagem do circuito de ensaio de tração.

Figura 19. Componentes eletrônicos para a montagem do circuito de ensaio de tração.

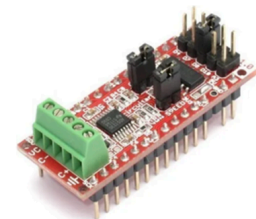


(a) Placa de controle

Fonte: WJ componentes eletrônicos



(b) Base board v1.0



(c) Módulo load cell v1.0

Fonte: Circuitar, (2022)

A câmera utilizada foi escolhida por sua alta resolução e taxa de transmissão, que permitiram a captura de imagens detalhadas dos materiais durante os ensaios. A marca Logitech e o modelo C920 com resolução máxima de 1920x1080 pixel, com ângulo de visão de 78 graus, foram selecionados por sua confiabilidade e adequação ao uso em ambientes de laboratório. O processador de imagem sem compactação e a faixa dinâmica maior do que 72dB possibilitaram uma reprodução precisa dos dados de imagem. Além disso, a porta USB2.0 permitiu a conexão rápida e fácil da câmera com outros dispositivos eletrônicos utilizados nos ensaios. A Figura 20, ilustra a câmera utilizada nos ensaios.

Figura 20. Câmera utilizada nos ensaios.



Fonte: Logitech, (2022).

Foi utilizado um computador com as seguintes especificações: processador i7-10700K com 8 núcleos e 16 threads, 32GB de memória DDR4, placa de vídeo GTX

1080TI e uma placa mãe Asus TUF GAMING B560M-PLU. O SSD utilizado teve uma velocidade de leitura de 500MB/s e de gravação de 450MB/s.

## 4.2 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Neste estudo, utilizou o MATLAB como plataforma de desenvolvimento devido à sua natureza iterativa e linguagem matricial, tornando-se particularmente adequado para a implementação de algoritmos de visão computacional. O *software* desenvolvido é estruturado em quatro componentes principais, cada um desempenhando uma função específica no processo de aquisição, processamento e análise de dados.

O primeiro módulo é encarregado da coleta de dados, que podem ser fornecidos diretamente pelos usuários para fins de calibração ou adquiridos por meio de interfaces de *hardware*, como dispositivos de visão computacional e controladores baseados em placa de controle. O segundo componente é responsável pelo loop de processamento, onde as informações coletadas são submetidas a técnicas de processamento e extração de características relevantes de imagem. O terceiro módulo aborda o pós-processamento e a análise dos dados capturados, empregando métodos estatísticos e algoritmos para obter insights significativos a partir das informações processadas. O último apresenta uma interface gráfica interativa, que permite a manipulação eficiente de dados e a interação com o *software*.

### 4.2.1 Aquisição de dados

É encarregado da coleta de dados, que podem ser fornecidos diretamente pelos usuários para fins de calibração ou adquiridos por meio de interfaces de *hardware*, como dispositivos de visão computacional e controladores baseados em placa de controle, com várias responsabilidades importantes: aquisição de dados e tara, comunicação serial, sincronização e taxa de amostragem e gerenciamento de comandos. É um papel fundamental na funcionalidade da ferramenta proposta e na estruturação do *software*. Neste contexto, duas capturas são cruciais para o desenvolvimento do projeto: a aquisição de dados realizada pela célula de carga pela placa de controle e a captura de imagens através de uma webcam.

### **4.2.2 Loop de processamento**

Foi desenvolvido um sistema para aquisição e processamento de imagens em tempo real, com capacidade de identificação e rastreamento de pontos de interesse. O sistema também realiza o cálculo da distância entre esses pontos e comunica com a placa de controle para adquirir dados de força. O algoritmo é composto por três etapas: inicialização e configuração, cálculo da distância inicial entre as regiões de interesse (ROIs) e o loop principal. O loop principal executa continuamente para capturar a imagem, processá-la, calcular a distância entre os centroides, comunicar com a placa de controle, atualizar os dados e gráficos, exibir a imagem com marcação dos pontos de interesse, e monitorar e interromper o ensaio quando necessário. Com isso, o sistema permite a realização de ensaios experimentais de forma automatizada e precisa, garantindo resultados confiáveis e reproduzíveis.

Ao sair do loop, a interface do usuário é atualizada com os valores finais da distância e habilita o botão de alternância de distância/deformação.

Este algoritmo demonstra uma abordagem eficiente e robusta para aquisição e processamento de imagens em tempo real, bem como para a comunicação com dispositivos externos, como a placa de controle em aplicações de engenharia. Ao combinar técnicas avançadas de processamento de imagem e comunicação serial, o algoritmo permite a análise precisa da distância entre pontos de interesse em imagens e a correlação com dados de força adquiridos simultaneamente.

### **4.2.3 Análise de dados capturados**

Durante a execução do algoritmo são armazenados em vetores específicos, que desempenham um papel crucial na realização de análises e avaliações pós-processamento. É importante observar que os dados provenientes tanto da câmera quanto da célula de carga estão sujeitos a ruídos e interferências, o que pode afetar a qualidade e precisão das análises realizadas.

A fim de abordar essa questão, o algoritmo emprega a técnica de mediana móvel para filtrar e atenuar os ruídos presentes nos dados. A mediana móvel é uma técnica de suavização de séries temporais que utiliza a mediana de um conjunto deslizando de amostras adjacentes, fornecendo uma estimativa mais robusta da

tendência central dos dados em comparação com a média móvel, especialmente em cenários com ruídos não gaussianos e outliers.

Na etapa de análise, os dados de força e distância entre os pontos de interesse são plotados em um gráfico bidimensional, permitindo a visualização e interpretação do comportamento da curva resultante. Essa representação gráfica facilita a identificação de padrões, tendências e possíveis anomalias nos dados, auxiliando na avaliação do desempenho do sistema e na tomada de decisões com base em informações quantitativas e objetivas.

#### **4.2.4 Interface gráfica**

A fim de facilitar o desenvolvimento do *software* e melhorar a experiência do usuário, foi proposta a criação de uma interface gráfica interativa, que permitisse a manipulação eficiente de dados e a interação com o programa. A interface também contribui para a compreensão dos resultados e a visualização de prévias em tempo real. A interface foi desenvolvida utilizando o ambiente *App Designer* do MATLAB.

Essa interface permite aos usuários ajustar diversos parâmetros diretamente, tais como: propriedades dos filtros aplicados aos algoritmos de processamento de imagem, limiares de binarização, áreas máximas e mínimas consideradas na região de interesse (ROI), e fatores multiplicadores dos eixos do gráfico. Além disso, a interface possibilita a realização de ajustes na célula de carga, como a tara, e a verificação dos valores lidos pela célula.

A interface gráfica também exibe métricas relevantes, incluindo a área de recorte da ROI, as distâncias inicial e final da ROI em pixels, a distância final em centímetros e os valores lidos pela célula de carga. Essa representação visual facilita o acompanhamento do desempenho do sistema e a avaliação dos resultados obtidos.

Por meio da interface gráfica, os usuários podem selecionar a área de interesse e testar o algoritmo de detecção de pontos de interesse, ajustando os parâmetros conforme necessário para obter resultados mais precisos e confiáveis.

A interface gráfica não apenas oferece diversas opções de personalização para a execução e para os algoritmos, mas também é responsável por exibir, em tempo real, o gráfico de deformação e o vídeo com as marcações da região de interesse (ROI). Essa visualização permite aos usuários acompanhar o progresso do experimento e analisar o comportamento do sistema.

Após o processamento dos dados, a interface facilita o acesso aos resultados, permitindo o *download* dos dados coletados e a exportação do vídeo processado. Essa funcionalidade proporciona aos usuários maior controle sobre os dados gerados e simplifica o processo de análise e compartilhamento dos resultados obtidos durante a execução do *software*.

A interface gráfica desenvolvida no MATLAB *App Designer* proporcionou uma experiência de usuário mais intuitiva e flexível, permitindo a customização de parâmetros e a visualização em tempo real dos resultados, além de facilitar o acesso aos dados coletados e a exportação do vídeo processado.

Foram empregadas técnicas de processamento de imagem para identificar e acompanhar os pontos de interesse, e algoritmos de filtragem e suavização de dados para lidar com ruídos presentes nos dados coletados. A análise dos dados envolveu a plotagem de gráficos relacionando a força e a distância dos pontos de interesse, o que possibilitou a compreensão do comportamento da curva de deformação.

Sendo assim foi apresentado um panorama detalhado das etapas de desenvolvimento do *software*, abordando as decisões de projeto, as técnicas e algoritmos empregados e a criação da interface gráfica.

## 4.3 ENSAIOS FÍSICOS

### 4.3.1 Equipamento para ensaios

Os ensaios experimentais de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaio (Emic) modelo DL30000 (EMIC, 2022), com conceito eletromecânico com acionamento através de fusos de esferas recirculantes, colunas guias e servo controle; atua em conjunto com o *software* de ensaios TESC-EMIC, responsável pelo controle do equipamento e pela aquisição dos dados do ensaio físico de acordo com as características originais de fábrica conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Principais características técnicas das máquinas de ensaio DL.

Modelo	DL-3000
Capacidade máxima (Kgf/kN)	3000/300
Tipo	Bifuso autoportante
Faixa de Velocidade (mm/min)	0,01 - 500
Curso máximo s/garras (mm)	1200
Largura útil entre as colunas (mm)	650
Dimensões (mm) (Altura/Largura/Profundidade)	2310/1580/1000

Fonte: Manual fabricante EMIC, 1969.

A escolha da máquina universal foi utilizada por ser um equipamento de referência para ensaio de tração, encontrada com grande frequência em universidades e instituições que utilizam ensaios físicos.

A Figura 21, ilustra a máquina utilizada nos ensaios do IFSP – Campus Votuporanga.

Figura 21. Máquina de ensaio DL 3000 – Emic.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.2 Ensaios experimentais com diferentes materiais

Os ensaios de tração foram realizados em corpos de prova de diferentes materiais, incluindo amostras de corpos de prova de alumínio e borracha. As velocidades de ensaio utilizadas foram de 10 mm/min, em conformidade com as velocidades recomendadas pela norma NBR ISO 6892 (ABNT, 2018). As amostras

foram produzidas de acordo com a norma ASTM E8, utilizando um perfil retangular. A Figura 22, ilustra o modelo do corpo de prova utilizado nos ensaios.

Onde:

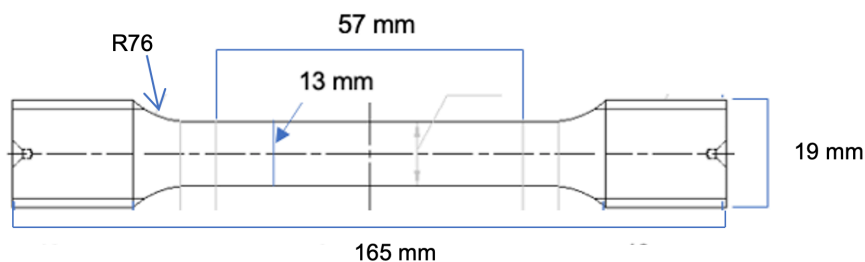
A = 165 mm (comprimento),

D = 13 mm (largura)

E = 3 mm (espessura)

$R_{\text{mínimo}} = 6\text{mm}$ .

Figura 22. Corpo de prova.



Fonte: ("Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials" AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2013) perfil retangular.

#### 4.3.2.1 Ensaio experimental com alumínio

Os ensaios foram realizados conforme item 4.2.2 em quatro amostras de espessura de 0,31mm, com as especificações técnicas.

- Espessura: 0,31 mm
- Peso específico: 2,7 g/cm<sup>3</sup>
- Resistência à tração: 50-90 MPa
- Alongamento na ruptura: 5-15%
- Dureza Brinell: 20-30 HB
- Condutividade térmica: 200-250 W/mK
- Temperatura de trabalho: -40°C a +120°C

#### 4.3.2.2 Ensaio experimental com borracha

Os ensaios foram realizados conforme item 4.2.2 em quatro amostras de espessura de 5mm, com as especificações técnicas.

- Dureza Shore A: 60-70

- Resistência à tração: 10-15 MPa
- Alongamento na ruptura: 200-300%
- Temperatura de operação: -30°C a +120°C
- Resistência à compressão: 10-20%
- Resistência a produtos químicos

#### 4.3.2.3 Protocolo experimental

Durante os ensaios de tração com os corpos de prova de alumínio e borracha. Foram realizadas as seguintes etapas, utilizou-se a máquina universal de tração, com célula de carga de 2,0 kN, a câmera Logitech, modelo C920 conectada ao computador e fixada na lateral da máquina, conforme ilustrado na Figura 24. A conexão entre a câmera e o computador foi estabelecida na entrada USB. A Figura 23, ilustra a montagem dos equipamentos para realização dos ensaios.

Figura 23. Montagem dos equipamentos para realização dos ensaios.



Fonte: Autoria própria

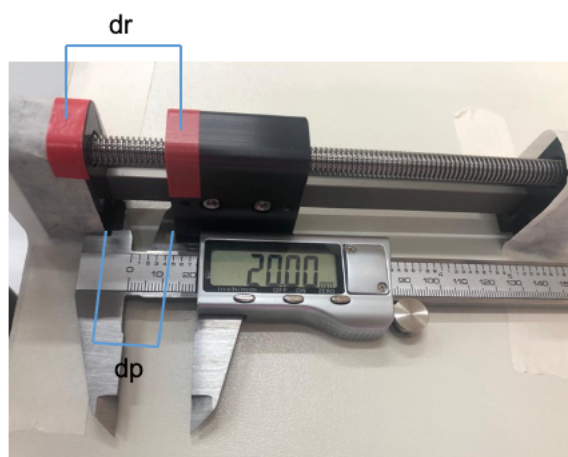
#### 4.4 MEDIÇÃO E PRECISÃO VÍDEO EXTENSÔMETRO

Realizou-se uma metodologia para verificar a precisão do vídeo extensômetro. Para isso, montou-se o vídeo extensômetro em uma bancada, utilizando uma câmera, placa de controle, uma célula de carga, um prolongador metálico de 200mm de extensão e um paquímetro digital da marca *Stainless*, modelo *Hardened*, com as seguintes especificações técnicas: faixa de medição de 0 a 150mm, exatidão de  $\pm 0,02\text{mm}/001$  ( $<100\text{mm}$ ) e resolução de  $0,01\text{mm}/0.0005$ , conforme mostrado na Figura 24.

Fixou-se o prolongador metálico na bancada, na parte superior e marcado um ponto em vermelho para facilitar a captação dos dados, inicialmente o prolongador foi aberto até a posição inicial. Em seguida, posicionamos o paquímetro paralelo ao prolongador, de forma a registrar o deslocamento de  $x$  milímetros em cada medição, onde realizou-se um número mínimo de medições para validar a precisão do sistema.

Nas medições, registrou-se a distância real ( $d_r$ ), que é a distância entre os centros do prolongador metálico, ou seja, a distância entre as marcações vermelhas. Também se obteve a distância registrada pelo paquímetro ( $d_p$ ), que serve como controle para o deslocamento para cada posição.

Figura 24. Montagem do prolongador metálico para coleta dos dados.



Fonte: Autoria própria.

O procedimento de verificação do vídeo extensômetro consistiu nos seguintes passos:

1 - Ligou-se o vídeo extensômetro e definiu-se a região de interesse.

2 - Verificou-se o algoritmo de detecção e o algoritmo alvo para a posição 1 (inicial), aguardando alguns segundos para coletar várias medições.

3 - Em seguida, deslocou-se para a posição 2, com um deslocamento de 5mm utilizando o paquímetro. Esperou-se estabilizar e coletou-se várias medições nessa posição.

4 - Repetiu-se o procedimento de quantos pontos desejados para a análise.

5 - Após coletar os dados em diferentes posições, elaborou-se a Tabela 5 para analisar a precisão das medidas obtidas com o vídeo extensômetro desenvolvido.

6 - Para cada posição, foram coletadas cinco medições aleatórias para elaboração da tabela e gráfico.

7 - Com base nessas medições, calculou-se a média, o desvio padrão, o erro e o erro percentual.

O objetivo dessa análise foi verificar se a metodologia utilizada estava coerente com o modelo desenvolvido e avaliou-se a precisão do vídeo extensômetro. Ao calcular a média das medidas para cada posição, obtém-se uma estimativa central dos valores registrados. O desvio padrão é utilizado para avaliar a dispersão dos dados em torno da média, fornecendo informações sobre a consistência das medições.

Tabela 5. Medidas para análise da precisão dos resultados do vídeo extensômetro.

Posição	Medida paquímetro (mm)	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio Padrão	Erro	Erro (%)
1										
2										

Fonte: Autoria própria.

Em seguida plotou-se um gráfico, onde no eixo x colocou-se as medições coletadas do vídeo extensômetros e no eixo y as quantidades de medições realizadas.

#### 4.5 NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA (TRL/MRL)

A TRL é uma escala que varia de 1 a 9, em que o nível 1 representa a tecnologia conceitual e o nível 9 representa a tecnologia totalmente madura e pronta para uso. A TRL/MLR facilita a comunicação entre diferentes partes envolvidas em um projeto tecnológico, garantindo um entendimento comum do progresso alcançado e dos próximos passos necessários para atingir a maturidade tecnológica desejada.

O propósito da TRL/MLR é permitir que os desenvolvedores, financiadores, reguladores e partes interessadas avaliem, de forma objetiva, o estado de desenvolvimento de uma tecnologia. Isso ajuda a tomar decisões informadas sobre investimentos, alocação de recursos, riscos e prazos.

O trabalho iniciou no TRL 1 com a pesquisa da linguagem a ser utilizada, com maior interação e viabilidade para desenvolvimento do *software*. No TRL 2 foi desenvolvido o *software* e testado por meio de simulações com diferentes análises gráficas e banco de dados para aplicação. Os TRL 3 e 4 foram testados em laboratórios e aplicou-se a tecnologia para análise dos gráficos e arquivos, validando sua estrutura. Atualmente, encontra-se na escala TRL 5, momento em que foram realizados ensaios com diferentes materiais (corpos de provas), computadores de mesa e notebook por meio de máquina universal. A próxima etapa seria levar o *software* e o *hardware* para um ambiente real e realizar ensaios em diferentes máquinas universais para verificar como a tecnologia se comporta em condições reais de operação. Isso ajudará a consolidar ainda mais a maturidade tecnológica do projeto.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 DESENVOLVIMENTO DO VIDEO EXTENSÔMETRO (*HARDWARE*)

A montagem do *hardware* consiste em uma célula de carga, que é conectada a um módulo ADC (conversor analógico-digital). Esse módulo possui uma taxa de aquisição de 80 amostras por segundo, um ganho de 128 vezes e uma sensibilidade de 2 mV/V. Além disso, apresenta uma precisão de 20 bits. O módulo ADC, por sua vez, é conectada a uma placa de controle através de uma comunicação SPI (Interface Periférica Serial).

A placa de controle estabelece uma comunicação serial com o programa principal do MATLAB, utilizando uma taxa de transmissão de 115.200 bits por segundo. A Figura 25, ilustra a montagem do *hardware* para vídeo extensômetro.

Figura 25. Montagem do *hardware* para vídeo extensômetro.



Fonte: Autoria própria.

### 5.2 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE (MATLAB)

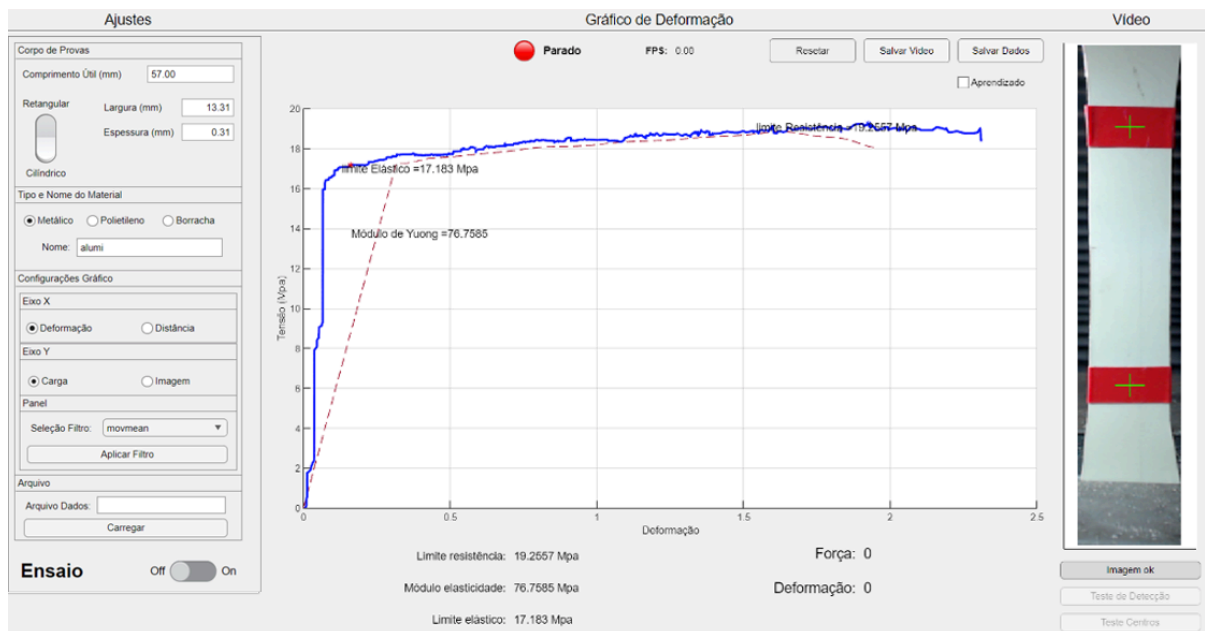
O desenvolvimento do *software* foi desenvolvido para realização da visão computacional. O MATLAB é usado como uma ferramenta poderosa para a detecção

e classificação automatizada das propriedades mecânicas em ensaios destrutivos e não destrutivos de materiais.

### 5.2.1 Interface do software

O software desenvolvido possibilita o usuário realizar as simulações, bem como realizar uma análise em ensaios físicos. A interface do software desenvolvido pode ser visualizada. A Figura 26, ilustra a tela principal, com abas de seleção, área gráfica e vídeo para apresentação dos resultados.

Figura 26. Tela principal software desenvolvido.

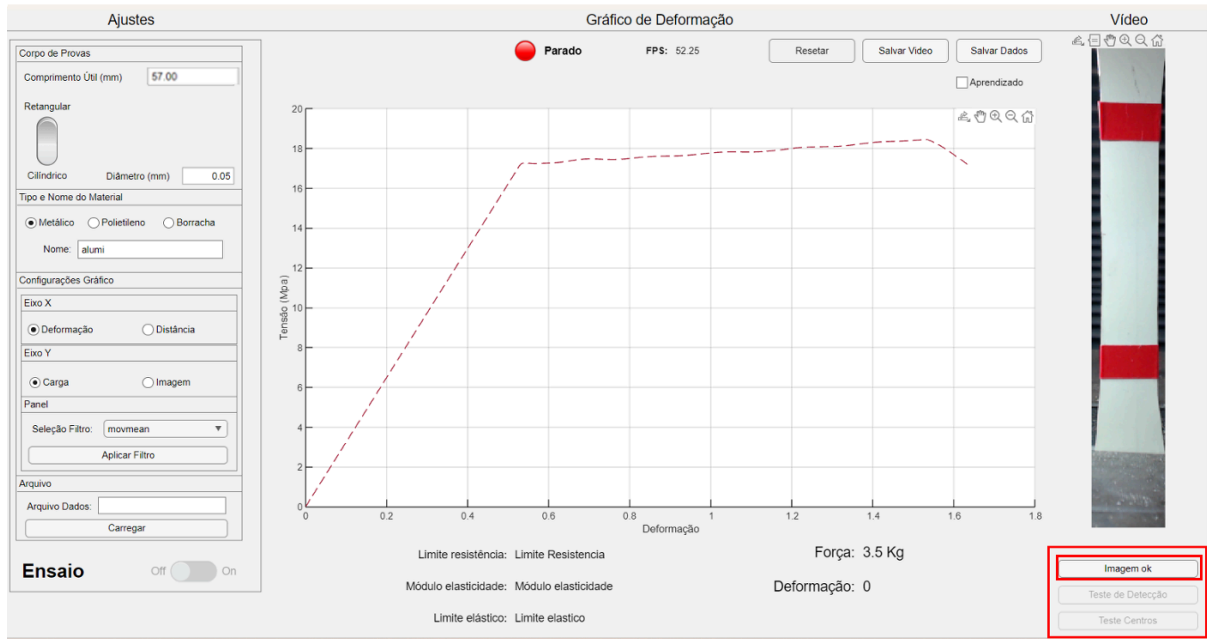


Fonte: Autoria própria.

Além disso, possui vários painéis auxiliares, possibilitando ao usuário a configuração e seleção de características do corpo de prova.

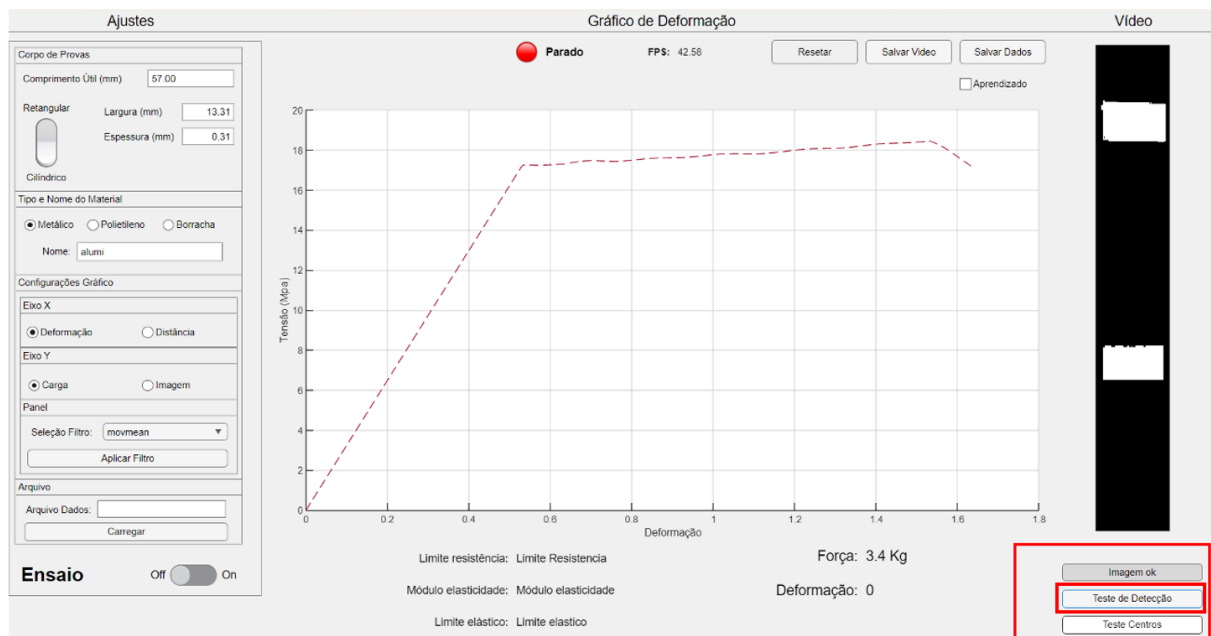
**Selecionar Região de Interesse:** Após a fixação do corpo de prova, é importante verificar se ele está na posição vertical e se o foco está dentro dos padrões adequados. A Figura 27, ilustra a região de interesse.

Figura 27. Ilustra a região de interesse.



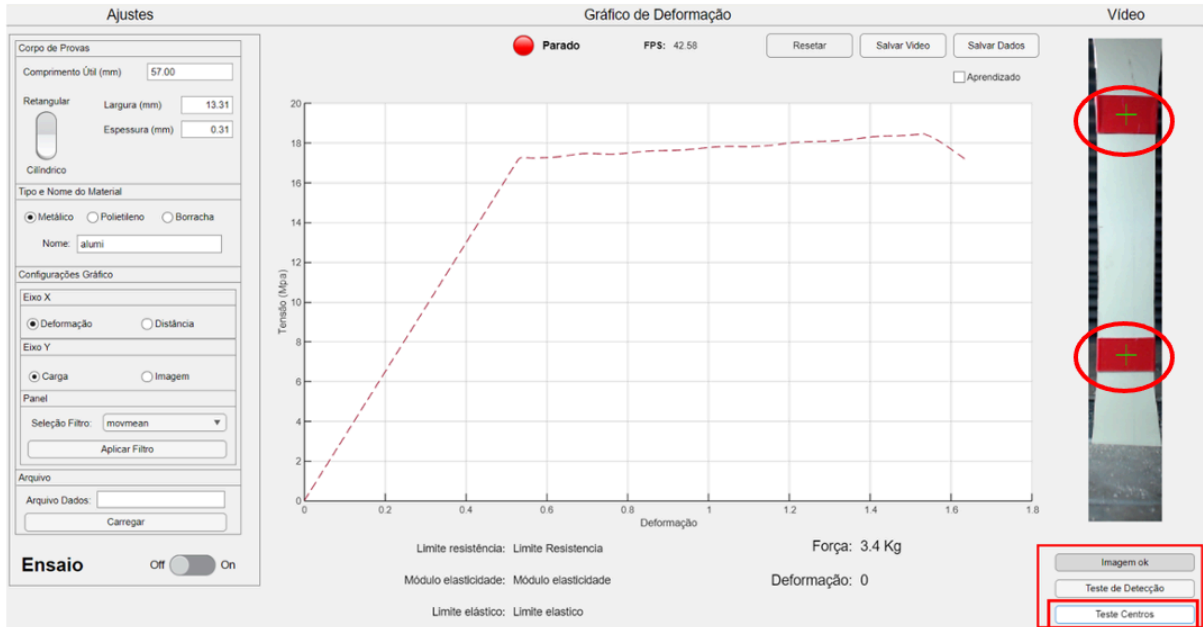
**Testar o Algoritmo de Detecção:** Esse passo permite verificar se a marcação em vermelho está legível e adequada. A Figura 28, ilustra o ponto de detecção para análise.

Figura 28. Ponto de detecção para análise.



**Testar o Algoritmo Alvo:** É importante verificar se o ponto em verde está centralizado no corpo de prova, já que essa informação é essencial para a realização do ensaio. A Figura 29, ilustra o ponto centralizado para iniciar o ensaio.

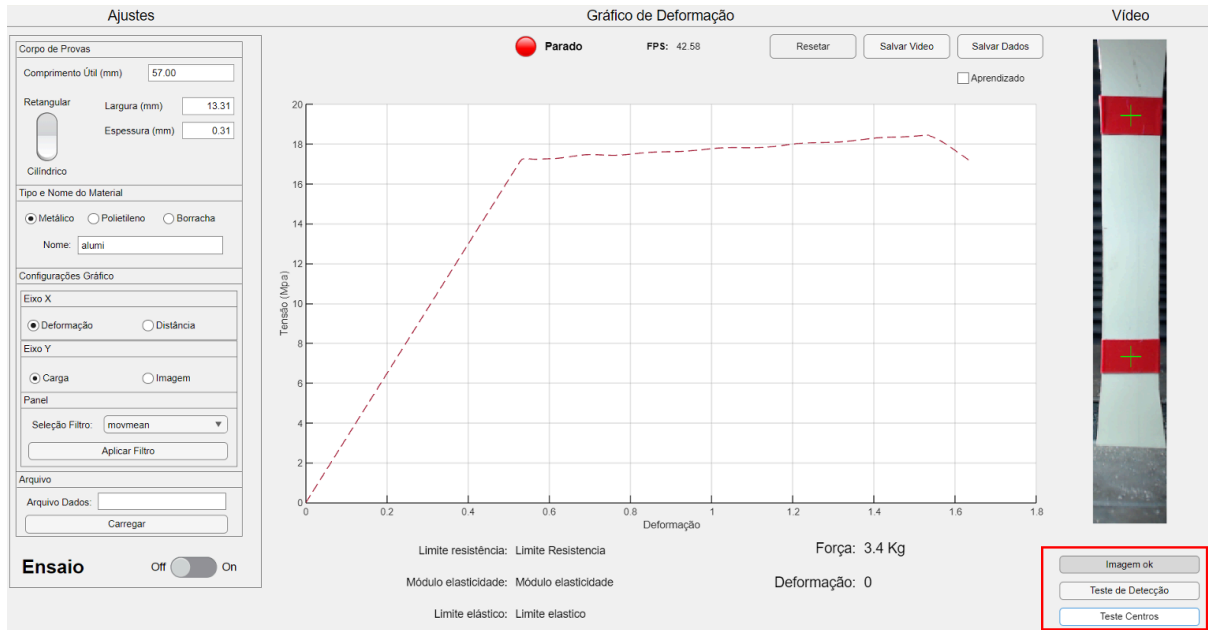
Figura 29. Ponto centralizado para iniciar o ensaio.



Fonte: Autoria própria.

**Tarar Célula carga:** Um dos recursos do *software* é sua capacidade de tarar células de carga, permitindo que os usuários monitorem a carga em tempo real e realizem ajustes precisos em seus equipamentos. Essa função é fundamental para parametrizar a célula de carga, garantindo que não haja tensão no início do ensaio. A Figura 30, ilustra a parametrização da célula de carga.

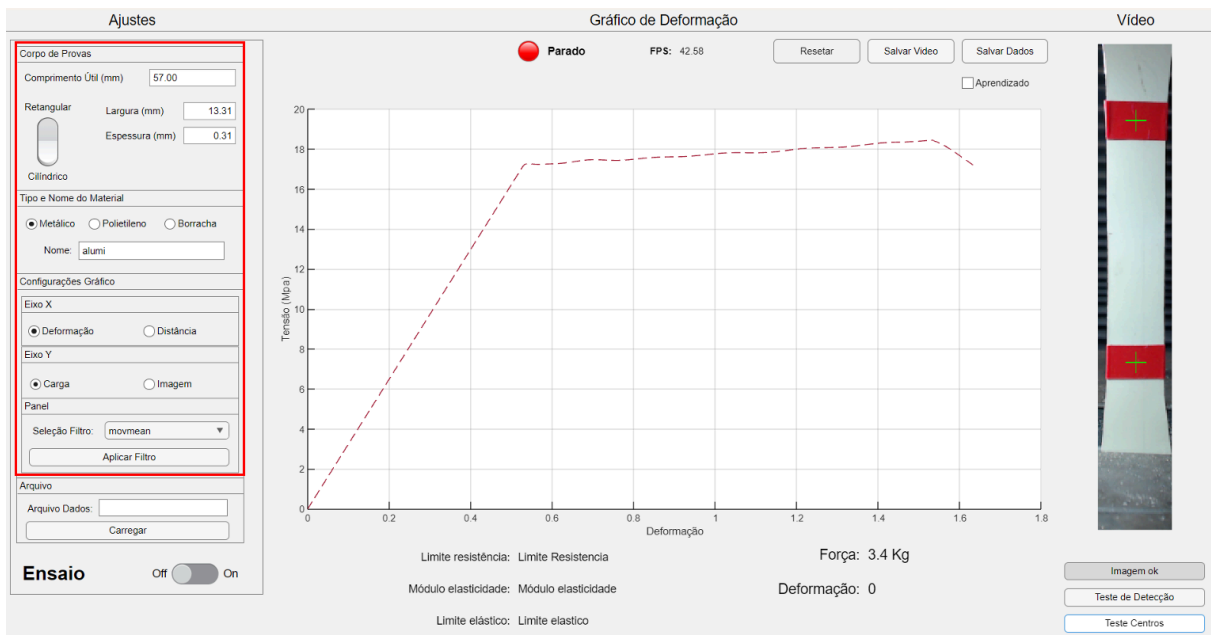
Figura 30. Ilustra a parametrização da célula de carga.



Fonte: Autoria própria.

**Configurar o Gráfico:** As etapas a seguir são necessárias para a plotagem do gráfico. A Figura 31, ilustra a tela para configurar antes do início do ensaio.

Figura 31. Tela para configurar antes do início do ensaio.



Fonte: Autoria Própria.

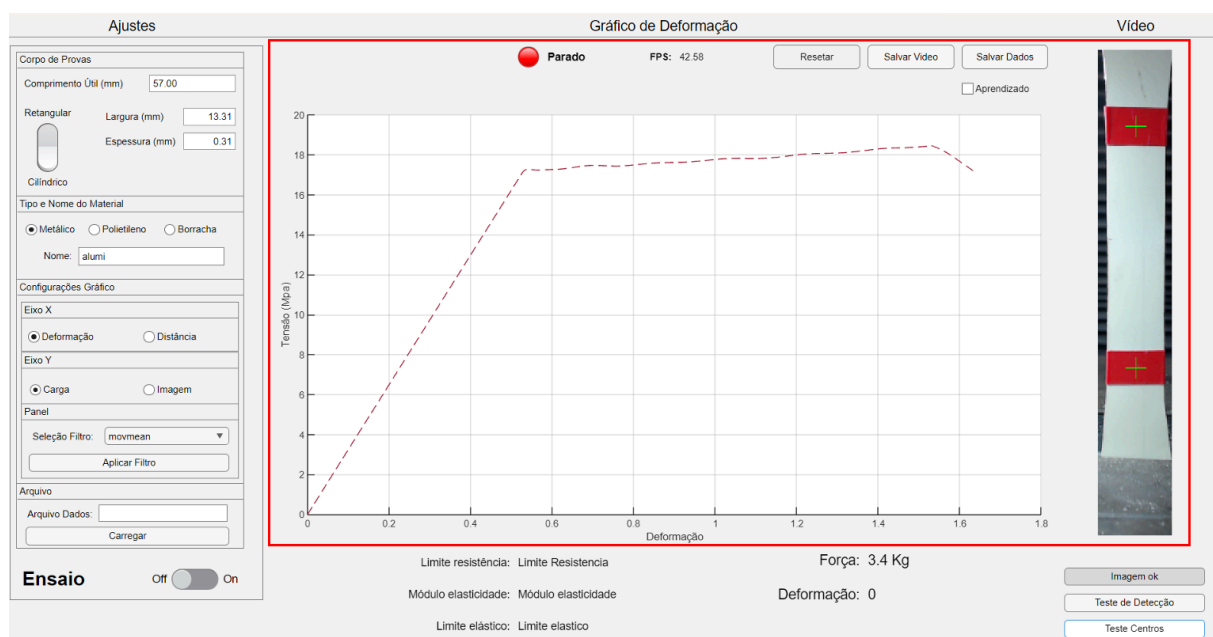
### Configurações do Gráfico:

- Velocidade de Atualização: É possível parametrizar a velocidade de plotagem do gráfico. Exemplo, 40 amostragens/atualização.
- Distância Inicial ROI (mm): Indica a distância entre as linhas de marcação vermelhas. Em nosso projeto, utilizamos uma distância de 57 mm;
- Distância de Deformação: É importante habilitar essa opção para que o *software* informe a distância de dilatação do corpo de prova;
- Suavização: Habilitar a opção de suavização (H) ajuda a remover impurezas do gráfico, deixando-o mais limpo. A função geralmente utilizada é a *roess*;
- Input de Força: Essa opção define a origem dos dados da captação de força, podendo ser via COM/USB (célula de carga) ou sequencial;
- Vídeo: Habilitar a opção de vídeo (H) permite a gravação dos ensaios;
- Arquivos de Dados: É possível inserir os arquivos de resultados dos ensaios e utilizar outra função de suavização para plotagem.

**Salvar dados / vídeos:** Além disso, o *software* desenvolvido permite que os resultados sejam salvos em formato de dados ou vídeo, o que possibilita o compartilhamento e análise posterior dos dados.

A Figura 32, ilustra a tela para salvar os dados do gráfico e o vídeo extensômetro.

Figura 32. Tela para salvar os dados do gráfico e o vídeo extensômetro.



Fonte: Autoria Própria.

## 5.3 ENSAIO EXPERIMENTAL

### 5.3.1 Ensaio experimental com alumínio

Os ensaios foram realizados conforme item 4.3.2.1 em quatro amostras de alumínio.

#### 5.3.1.1 Função módulo de Young ou módulo de elasticidade no alumínio

O Módulo de Young é determinado através da aplicação direta da fórmula presente na equação (3.5). Essa fórmula calcula o módulo utilizando a relação entre a tensão aplicada e a deformação. Um exemplo disso pode ser visto no código da Figura 33.

Figura 33. Código do *software* para cálculo do módulo de Young.

```

if (app.CargaButton.Value)
    if length(app.A) > 30
        app.UIAxes.NextPlot = 'add';
        [app.CargaMaxima, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
        app.ModuloYuong, app.CargaLimiteElastico, ...
        app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.PosicaoElastico]=PontosInteresse(app, app.C ,app.A );
        plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
        app.CargaMaxima, 'b');
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima * .8,
        app.CargaMaxima * .99, ...

                strcat('limite Resistência = ',
num2str(app.CargaMaxima), ' Mpa'), 'FontSize', 14);
        plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.CargaLimiteElastico, 'r');
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico *
        .8, app.CargaLimiteElastico * .99, ...

                strcat('limite Elástico = ',
num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa'), 'FontSize', 14);
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.CargaLimiteElastico * .8, ...
                strcat('Módulo de Yuong =
', num2str(app.ModuloYuong)), 'FontSize', 14 );
        app.MduloelasticidadeLabel_2.Text =
        strcat(num2str(app.ModuloYuong), ' Mpa');
        app.LimiteelasticoLabel.Text =
        strcat(num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa');
        app.LimiteResistenciaLabel.Text =
        strcat(num2str(app.CargaMaxima), ' Mpa');
    end
end

%Função Localização dos pontos de interesse
function [CargaMaxima, DeslocamentoNaCargaMaxima,
ModuloYuong,
CargaLimiteElastico, ...
DeslocamentoLimiteElastico, ElasX ] = ...
PontosInteresse(~, Carga, Deslocamento)

[Carga, Deslocamento] = DelDuplicados(Carga,
Deslocamento);

ElasX = 1;
CargaMaxima = max(max(Carga));
[Posicao, ~] = find(Carga == CargaMaxima, 1);
DeslocamentoNaCargaMaxima =
Deslocamento(Posicao);
Deformacao = 0:0.01:Deslocamento(end)-0.01;
Forca_INT = interp1(Deslocamento, Carga, Deformacao);
Comprimento = length(Forca_INT);

DeslocamentoLimiteElastico =
Deformacao(fix(Comprimento*.8));
CargaLimiteElastico = Forca_INT(fix(Comprimento*.8));
ModuloYuong = tan(0.5*pi/180);
[F, ~] = max(Forca_INT);
[~, I] = find(Forca_INT > (F*.3), 1, 'first');
if I == 1
    I=2;
end

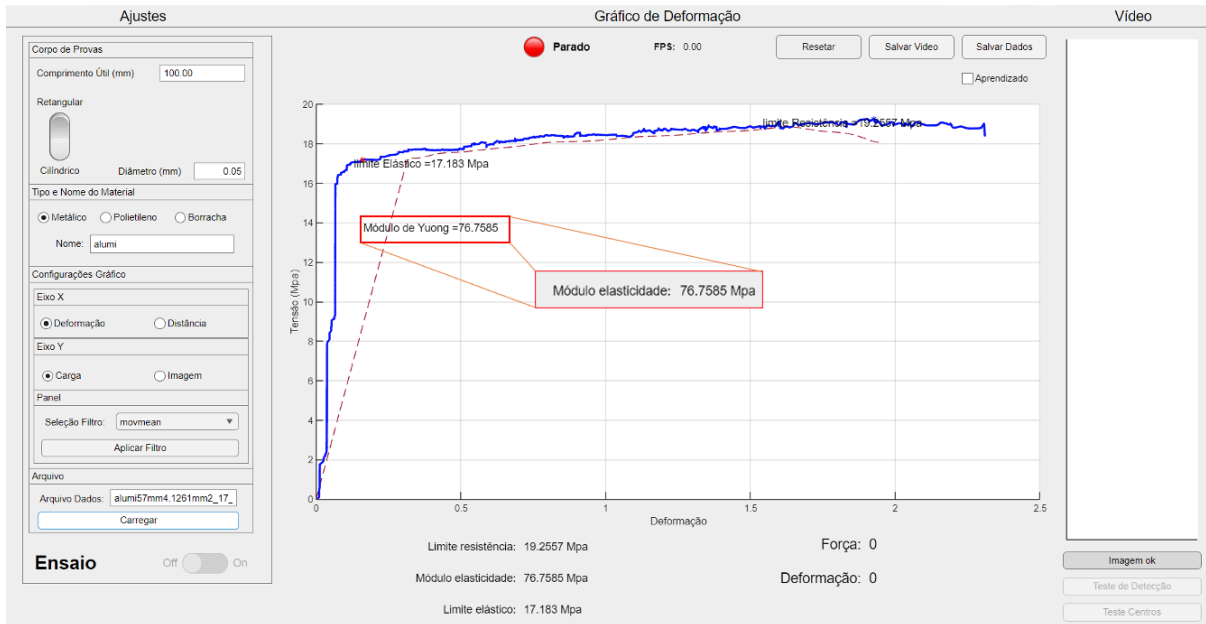
for n = 1:fix(length(Deformacao)*.89)

```

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 34, ilustra no ensaio com o corpo de prova em alumínio define o módulo de Young ou módulo de elasticidade.

Figura 34. Detalhe do Módulo de Young ou Módulo de Elasticidade no alumínio.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.3.1.2 Função limite elástico no alumínio

Utilizando o método de Johnson como base, uma função foi incorporada ao *software* para o cálculo do ponto "P", o qual delimita o fim do regime elástico do material ensaiado. Esse cálculo é realizado por meio das equações, e o processo de implementação pode ser observado no código que abrange, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35. Código do *software* para cálculo do limite elástico.

```

if (app.CargaButton.Value)
    if length(app.A) > 30
        app.UIAxes.NextPlot = 'add';
        [app.CargaMaxima, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
        app.ModuloYuong, app.CargaLimiteElastico, ...
        app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.PosicaoElastico]=PontosInteresse(app, app.C ,app.A );
        plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
        app.CargaMaxima, 'b*');
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima * .8,
        app.CargaMaxima * .99, ...

                strcat('limite Resistência = ',
        num2str(app.CargaMaxima), ' Mpa'), 'FontSize', 14);
        plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.CargaLimiteElastico, 'r*');
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico *
        .8, app.CargaLimiteElastico * .99, ...

                strcat('limite Elástico = ',
        num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa'), 'FontSize', 14);
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.CargaLimiteElastico * .8, ...
                strcat('Módulo de Yuong =
        ', num2str(app.ModuloYuong)), 'FontSize', 14 );
        app.MduloelasticidadeLabel_2.Text =
        strcat(num2str(app.ModuloYuong), ' Mpa');
        app.LimiteelasticoLabel.Text =
        strcat(num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa');
        app.LimiteResistencialLabel.Text =
        strcat(num2str(app.CargaMaxima), ' Mpa');
        end
    end
end

%Função Localização dos pontos de interesse
function [CargaMaxima, DeslocamentoNaCargaMaxima,
ModuloYuong,
CargaLimiteElastico, ...
DeslocamentoLimiteElastico, ElasX ] = ...
PontosInteresse(~, Carga, Deslocamento)

[Carga, Deslocamento] = DelDuplicados(Carga,
Deslocamento);

ElasX = 1;
CargaMaxima =max(max(Carga));
[Posicao, ~] = find(Carga == CargaMaxima, 1);
DeslocamentoNaCargaMaxima =
Deslocamento(Posicao);
Deformacao = 0:0.01:Deslocamento(end)-0.01;
Forca_INT = interp1(Deslocamento,Carga,Deformacao);
Comprimento = length(Forca_INT);

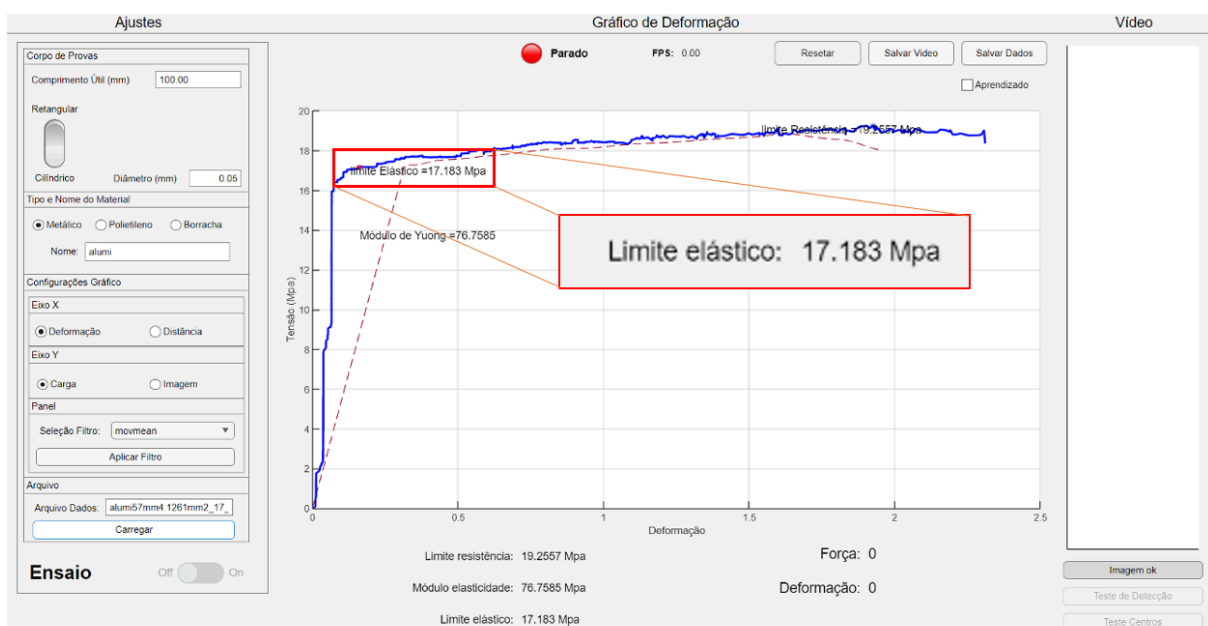
DeslocamentoLimiteElastico =
Deformacao(fix(Comprimento*.8));
CargaLimiteElastico = Forca_INT(fix(Comprimento*.8));
ModuloYuong = tan(0.5*pi/180);
[F,~] = max(Forca_INT);
[~,I] = find(Forca_INT>(F*.3),1, 'first');
if I == 1
    I=2;
end
for n = 1:fix(length(Deformacao)*.89)

```

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados são exibidos na área gráfica do *software*, indicando tanto a posição quanto o valor. Isso é ilustrado com um zoom na Figura 36.

Figura 36. Detalhe para o limite elástico no alumínio.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.3.1.3 Função limite de escoamento no alumínio

O *software* calcula a reta paralela auxiliar usando a informação do desvio 'n' escolhido pelo usuário. Isso é feito para determinar o limite de escoamento de acordo com as especificações do item 3.3.4. Os desvios constantes da Tabela 2, que estão pré-definidos no arquivo de dados do *software*, também são utilizados nesse cálculo. A Figura 14 exemplifica a curva típica do limite de escoamento.

Esse cálculo é realizado por meio das equações, e o processo de implementação pode ser observado no código que abrange, conforme apresentado na Figura 37.

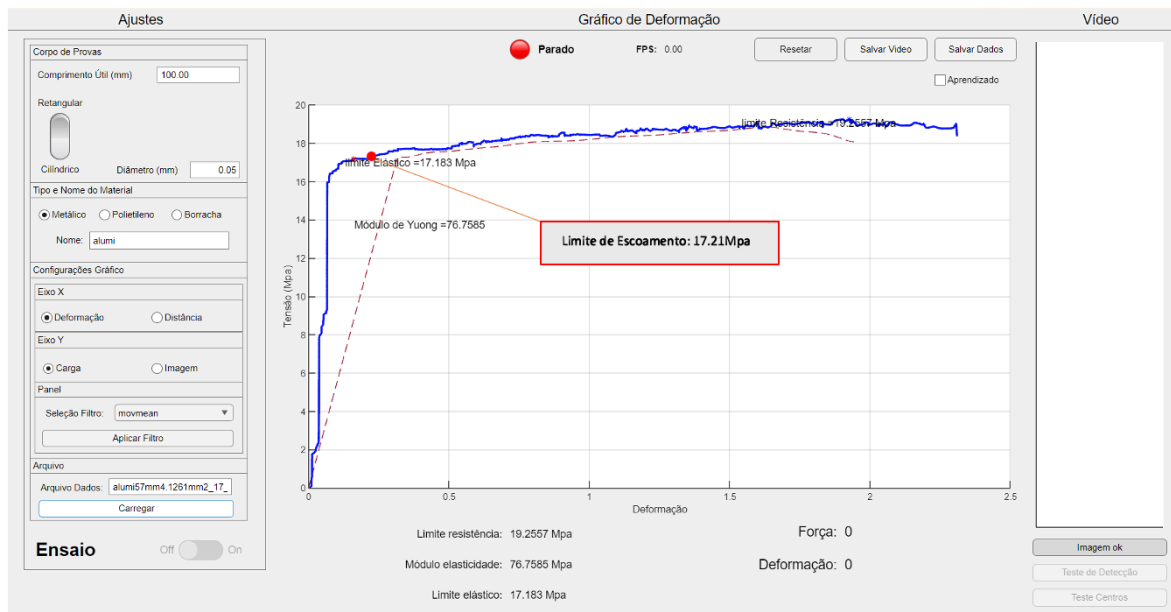
Figura 37. Código do *software* para cálculo do limite de escoamento.

```
for i = inicio: Comprimento
    Desv = MatrizAlongamento(i) * Myoung;
if matrizCarga(i+AuxFator) <= Desv
    EscoaX = i+AuxFator;
    EscoaY = i+AuxFator;
    Deltamm = MatrizAlongamento(i);
    Carga = matrizCarga(i);
    break
end
end
```

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados são exibidos na área gráfica do *software*, indicando tanto a posição quanto o valor. Isso é ilustrado com um zoom na Figura 38.

Figura 38. Detalhe para o limite escoamento no alumínio.



Fonte: Autoria Própria.

#### 5.3.1.4 Função limite de resistência alumínio

O *software* calcula o limite de resistência ao buscar a tensão máxima da curva do ensaio, utilizando a função pré-existente "max( )" dentro do ambiente Matlab. Esse cálculo é ilustrado na Figura 39, onde contém a referida função.

Figura 39. Código do *software* para localização do limite de resistência.

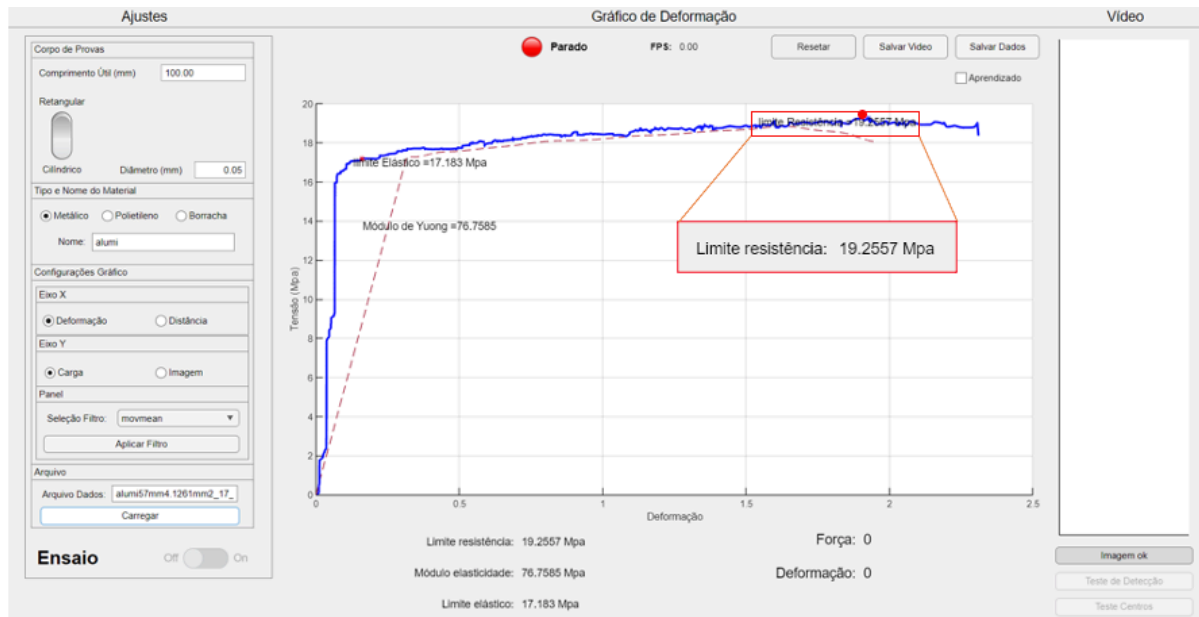
```
% Função limite de resistencia

function [LimiteResX,LimiteResY, PosX] = Resistencia(~, matrizCarga, MatrizAlongamento)
    [LimiteResY,PosX] = max(matrizCarga,[],'linear');
    LimiteResX = MatrizAlongamento(PosX);
end
```

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados são exibidos na área gráfica do *software*, indicando tanto a posição quanto o valor. Isso é ilustrado com um zoom na Figura 40.

Figura 40. Detalhe para limite de resistência no alumínio.

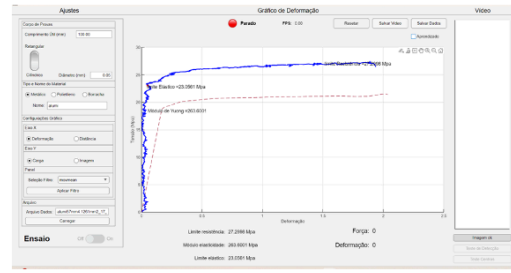
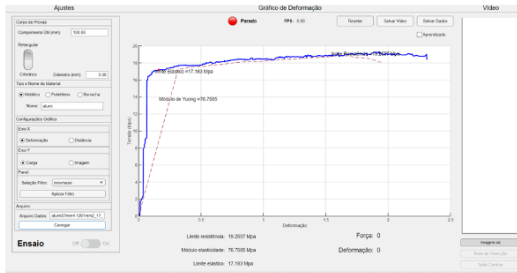


Fonte: Autoria Própria.

### 5.3.1.5 Função curva do aprendizado alumínio

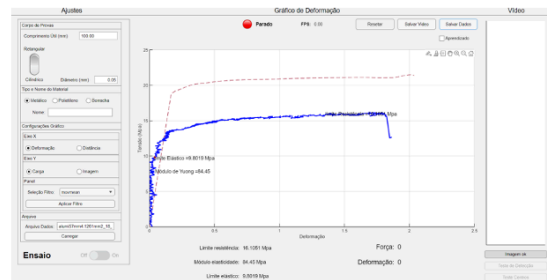
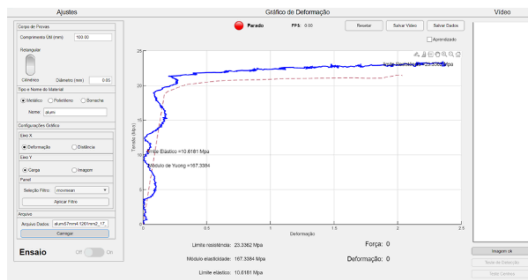
Foram conduzidos diversos ensaios físicos para construir a curva de aprendizado do material de alumínio. Inicialmente, o primeiro ensaio resultou na curva de aprendizado 1. Prosseguindo, um segundo ensaio foi realizado, gerando a curva de aprendizado 2. Através de múltiplos ensaios, uma curva característica do material de referência foi estabelecida. É importante ressaltar que todas as curvas obtidas foram incorporadas a esse padrão. A Figura 41 ilustra esses quatro ensaios de forma sequencial. O ensaio 2 é representado junto à curva de aprendizado 1, seguido pelo ensaio 3 acompanhado da curva de aprendizado 2. Da mesma forma, o ensaio 4 é visualizado com a curva de aprendizado 3, enquanto o ensaio 5 é associado à curva de aprendizado 4.

Figura 41. Curvas dos ensaios em alumínio com as respectivas curvas de aprendizado.



Ensaio 2 é representado junto à curva de aprendizado 1

Ensaio 3 é representado junto à curva de aprendizado 2



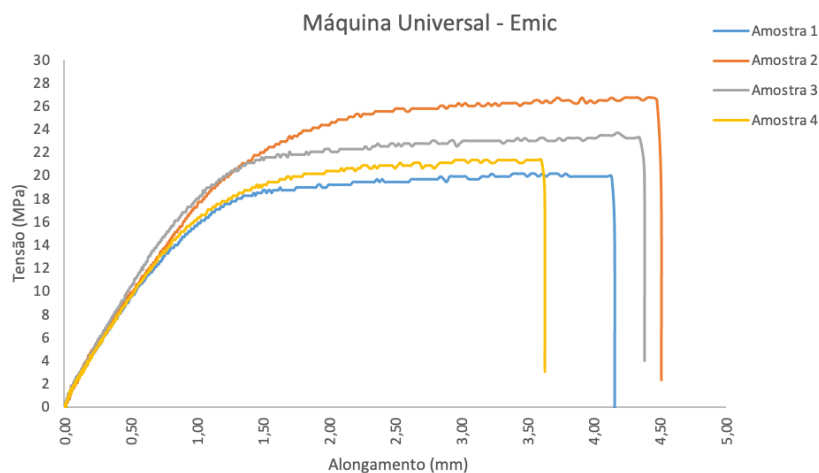
Ensaio 4 é representado junto à curva de aprendizado 3

Ensaio 5 é representado junto à curva de aprendizado 4

Fonte: Autoria própria.

Apresentamos as curvas de tensão x deformação dos gráficos plotados, comparando os resultados obtidos no ensaio com o corpo de prova em alumínio, tanto na máquina universal, quanto no *software* desenvolvido. A Figura 42, ilustra a curva tensão x deformação no ensaio realizado na máquina universal.

Figura 42. Curva tensão x deformação no ensaio realizado em alumínio na máquina universal.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados dos ensaios físicos realizados no corpo de prova de alumínio na máquina universal estão mostrados na Tabela 6 abaixo.

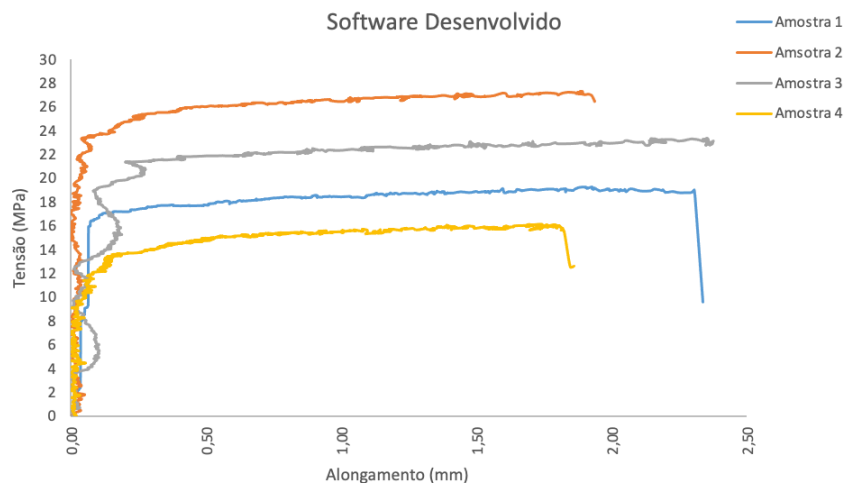
Tabela 6. Resultados dos ensaios físicos pela máquina universal na amostra de alumínio.

Ponto	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Módulo de Elasticidade (Young)	1094,40	1163,3	1197,0	1117,2
Limite Elástico (MPa)	18,60	25,0	21,0	18,7
Limite de Escoamento (MPa)	18,64	25,1	21,3	18,74
Limite de Resistência (MPa)	20,13	26,76	23,68	21,31
Tensão de Ruptura (MPa)	19,89	26,52	23,21	20,84

Fonte: Autoria própria.

A Figura 43, ilustra a curva tensão x deformação no ensaio em alumínio realizado no *software* desenvolvido.

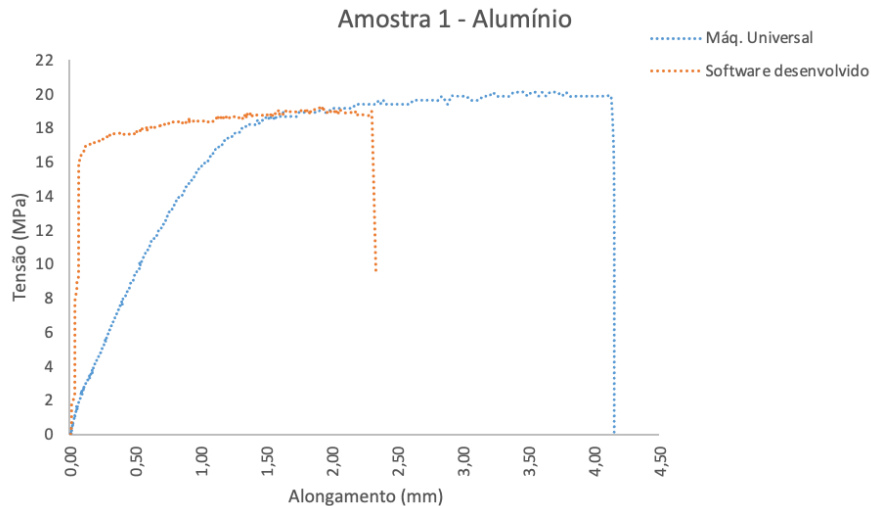
Figura 43. Curva tensão x deformação no ensaio realizado em alumínio no *software* desenvolvido.



Fonte: Autoria própria.

Apresentamos as curvas de tensão x deslocamento dos gráficos plotados na mesma base, comparando os resultados obtidos no ensaio com o corpo de prova de alumínio, tanto na máquina universal, quanto no *software* desenvolvido, conforme demonstrado na Tabela 11 e 12. A Figura 44, ilustra a curva tensão x deformação em alumínio na amostra 1.

Figura 44. Curva tensão x deformação em alumínio na amostra 1.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos na análise da curva do ensaio de tração utilizando o método de processamento de imagens digitais demonstraram um comportamento semelhante aos resultados obtidos na máquina universal. Além disso, o modelo desenvolvido também apresentou similaridade, o que comprova a validade e confiabilidade dos resultados obtidos por meio do método de processamento de imagens digitais utilizado neste trabalho, conforme demonstrado na Tabela 11 e 12.

Os resultados dos ensaios físicos realizados no corpo de prova de alumínio no vídeo extensômetro desenvolvido estão mostrados na Tabela 7 abaixo.

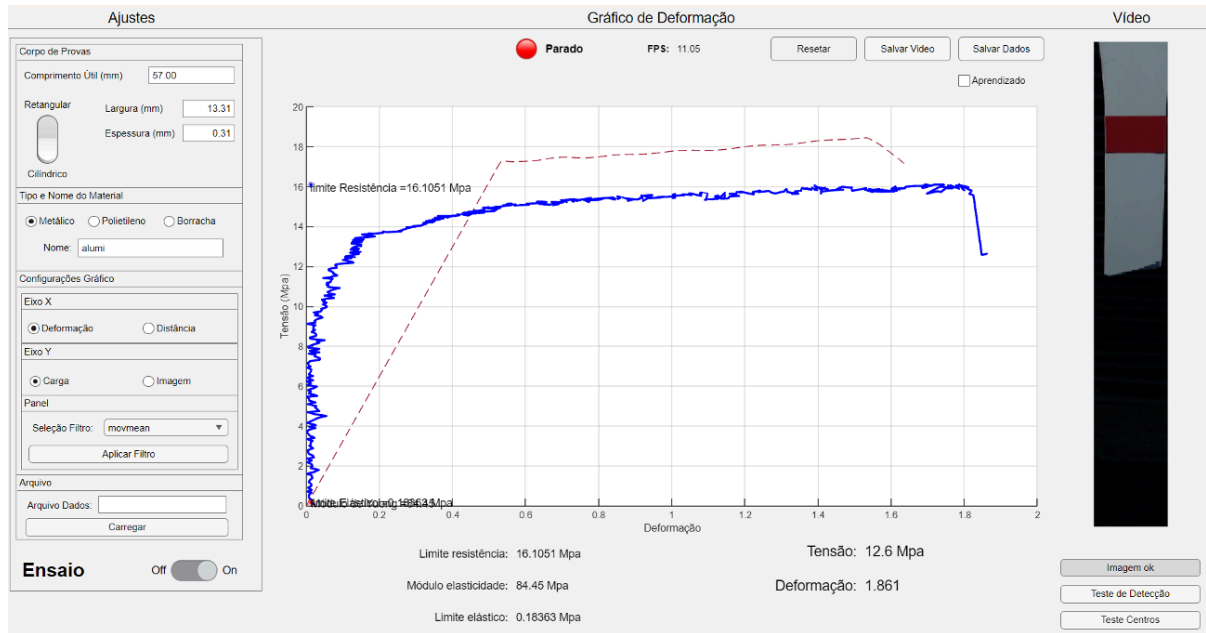
Tabela 7. Resultados dos ensaios físicos pelo vídeo extensômetro desenvolvido na amostra de alumínio.

Ponto	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Módulo de Elasticidade (Young)	76,76	263,60	167,34	84,85
Limite Elástico (MPa)	17,18	23,06	10,62	9,80
Limite de Escoamento (MPa)	17,21	23,11	10,64	9,82
Limite de Resistência (MPa)	19,26	27,29	23,34	16,11
Tensão de Ruptura (MPa)	18,36	26,43	22,87	15,62

Fonte: Autoria própria.

A Figura 45, ilustra os pontos de ensaios físicos: módulo de elasticidade, limite elástico, limite de escoamento, limite de resistência e tensão de ruptura na amostra 3 no corpo de prova de alumínio.

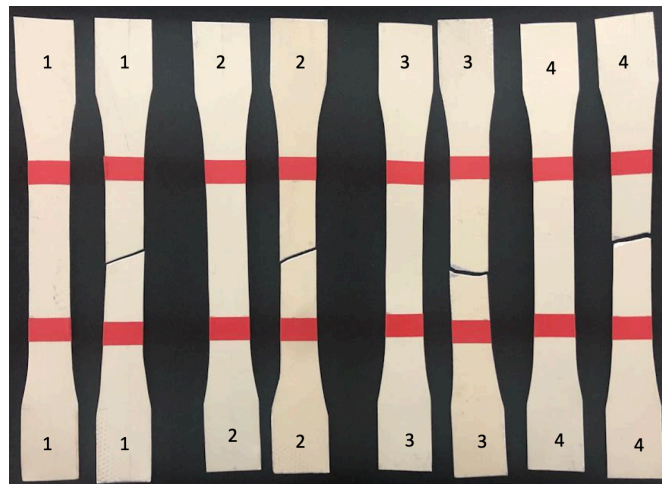
Figura 45. Pontos de ensaio físico na amostra 3 de alumínio.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida, apresentamos os corpos de prova utilizados no ensaio de tração uniaxial antes e após o teste pela máquina universal. Após o ensaio, os corpos de prova foram retirados da máquina e suas deformações foram registradas para análise posterior. A figura 46, ilustra os corpos de provas em alumínio antes e após os ensaios.

Figura 46. Corpos de prova em alumínio antes e após os ensaios.



Fonte: Autoria própria.

E por fim, apresentamos o vídeo do corpo de prova utilizados no ensaio de tração uniaxial no início e no seu rompimento por meio de vídeo sequência. Após o

ensaio, os corpos de prova foram retirados da máquina e suas deformações foram registradas para análise posterior. A Figura 47, ilustra as etapas do vídeo.

Figura 47. Etapas do vídeo no rompimento dos corpos de prova em alumínio.



Fonte: Autoria própria.

### 5.3.2 Ensaio experimental com borracha

Os ensaios foram realizados conforme item 4.2.2.2 em quatro amostras de borracha.

#### 5.3.2.1 Função módulo de Young ou módulo de elasticidade na borracha

O Módulo de Young é determinado através da aplicação direta da fórmula presente na equação (3.5). Essa fórmula calcula o módulo utilizando a relação entre a tensão aplicada e a deformação. Um exemplo disso pode ser visto no código da Figura 48.

Figura 48. Código do software para cálculo do módulo de Young.

```

if (app.CargaButton.Value)
    if length(app.A) > 30
        app.UIAxes.NextPlot = 'add';
        [app.CargaMaxima, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
        app.ModuloYuong, app.CargaLimiteElastico, ...
        app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.PosicaoElastico]=PontosInteresse(app, app.C ,app.A );
        plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
        app.CargaMaxima,'b*');
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima * .8,
        app.CargaMaxima * .99, ...

                strcat('limite Resistência = ',
        num2str(app.CargaMaxima),' Mpa'),'FontSize',14);
        plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.CargaLimiteElastico,'r*');
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico *
        .8, app.CargaLimiteElastico * .99, ...

                strcat('limite Elástico = ',
        num2str(app.CargaLimiteElastico),' Mpa'),'FontSize',14);
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.CargaLimiteElastico * .8, ...
                strcat('Módulo de Yuong =
        ',num2str(app.ModuloYuong)),'FontSize',14 );
        app.MduloelasticidadeLabel_2.Text =
        strcat(num2str(app.ModuloYuong),' Mpa');
        app.LimiteelasticoLabel.Text =
        strcat(num2str(app.CargaLimiteElastico),' Mpa');
        app.LimiteResistenciaLabel.Text =
        strcat(num2str(app.CargaMaxima),' Mpa');
        end
    end

%Função Localização dos pontos de interesse
function [CargaMaxima, DeslocamentoNaCargaMaxima,
ModuloYuong,
CargaLimiteElastico, ...
DeslocamentoLimiteElastico, ElasX ] = ...
PontosInteresse(~, Carga, Deslocamento)

[Carga, Deslocamento] = DelDuplicados(Carga,
Deslocamento);

ElasX = 1;
CargaMaxima =max(max(Carga));
[Posicao, ~]= find(Carga == CargaMaxima, 1);
DeslocamentoNaCargaMaxima =
Deslocamento(Posicao);
Deformacao = 0:0.01:Deslocamento(end)-0.01;
Forca_INT = interp1(Deslocamento,Carga,Deformacao);
Comprimento = length(Forca_INT);

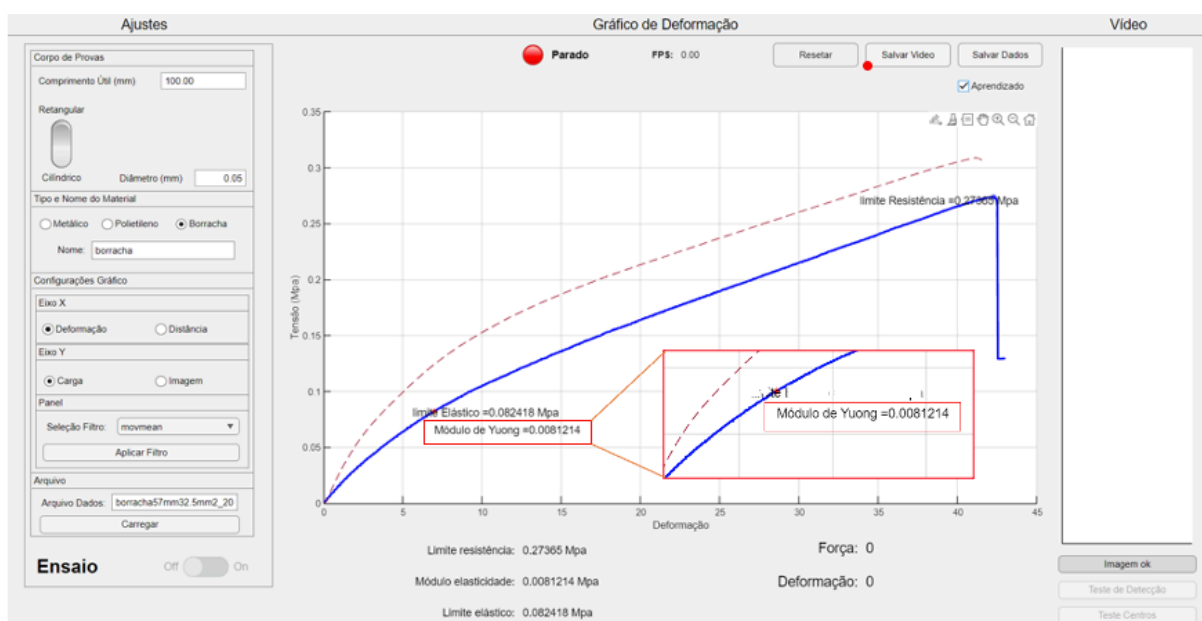
DeslocamentoLimiteElastico =
Deformacao(fix(Comprimento*.8));
CargaLimiteElastico = Forca_INT(fix(Comprimento*.8));
ModuloYuong = tan(0.5*pi/180);
[F,~] = max(Forca_INT);
[~,I] = find(Forca_INT>(F*.3),1,'first');
if I == 1
    I=2;
end
for n = 1:fix(length(Deformacao)*.89)

```

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 49, ilustra no ensaio com o corpo de prova em borracha define o módulo de Young ou módulo de elasticidade.

Figura 49. Detalhe do módulo de Young ou módulo de elasticidade em borracha.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.3.2.2 Função limite elástico na borracha

Utilizando o método de Johnson como base, uma função foi incorporada ao *software* para o cálculo do ponto "P", o qual delimita o fim do regime elástico do material ensaiado. Esse cálculo é realizado por meio das equações, e o processo de implementação pode ser observado no código que abrange, conforme apresentado na Figura 50.

Figura 50. Código do *software* para cálculo do limite elástico.

```

if (app.CargaButton.Value)
    if length(app.A) > 30
        app.UIAxes.NextPlot = 'add';
        [app.CargaMaxima, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
        app.ModuloYuong, app.CargaLimiteElastico, ...
        app.DeslocamentoLimiteElastico,
        app.PosicaoElastico]=PontosInteresse(app, app.C ,app.A );
        plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
        app.CargaMaxima, 'b*');
        text(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima * .8,
        app.CargaMaxima * .99, ...

            strcat('limite Resistência = ',
            num2str(app.CargaMaxima), ' Mpa'), 'FontSize', 14);
            plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
            app.CargaLimiteElastico, 'r*');
            text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico *
            .8, app.CargaLimiteElastico * .99, ...

                strcat('limite Elástico = ',
                num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa'), 'FontSize', 14);
                text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
                app.CargaLimiteElastico * .8, ...
                strcat('Módulo de Yuong =
                ', num2str(app.ModuloYuong)), 'FontSize', 14 );
                app.MduloelasticidadeLabel_2.Text =
                strcat(num2str(app.ModuloYuong), ' Mpa');
                app.LimiteelasticoLabel.Text =
                strcat(num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa');
                app.LimiteResistenciaLabel.Text =
                strcat(num2str(app.CargaMaxima), ' Mpa');
            end
        end
    end

%Função Localização dos pontos de interesse
function [CargaMaxima, DeslocamentoNaCargaMaxima,
ModuloYuong,
CargaLimiteElastico, ...
DeslocamentoLimiteElastico, ElasX ] = ...
PontosInteresse(~, Carga, Deslocamento)

[Carga, Deslocamento] = DelDuplicados(Carga,
Deslocamento);

ElasX = 1;
CargaMaxima =max(max(Carga));
[Posicao, ~] = find(Carga == CargaMaxima, 1);
DeslocamentoNaCargaMaxima =
Deslocamento(Posicao);
Deformacao = 0:0.01:Deslocamento(end)-0.01;
Forca_INT = interp1(Deslocamento,Carga,Deformacao);
Comprimento = length(Forca_INT);

DeslocamentoLimiteElastico =
Deformacao(fix(Comprimento* .8));
CargaLimiteElastico = Forca_INT(fix(Comprimento* .8));
ModuloYuong = tan(0.5*pi/180);
[F, ~] = max(Forca_INT);
[~, I] = find(Forca_INT > (F*.3), 1, 'first');
if I == 1
    I=2;
end

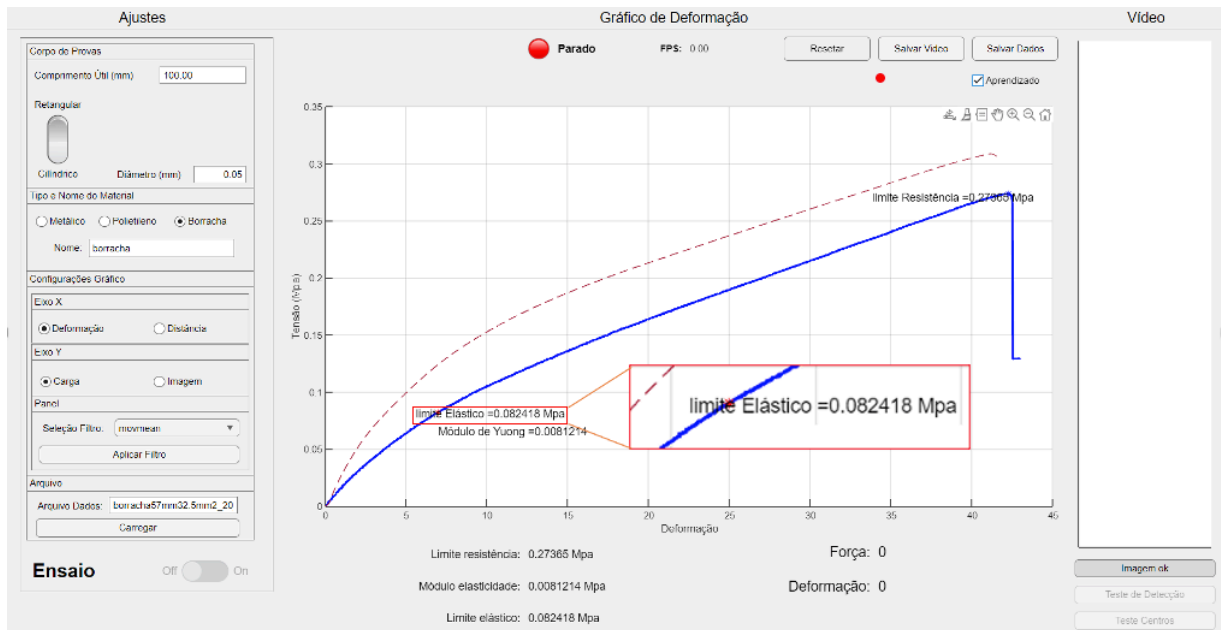
for n = 1:fix(length(Deformacao)*.89)

```

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados são exibidos na área gráfica do *software*, indicando tanto a posição quanto o valor. Isso é ilustrado com um zoom na Figura 51.

Figura 51. Detalhe para o limite elástico em borracha.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.3.2.3 Função limite de escoamento na borracha

A *software* calcula a reta paralela auxiliar usando a informação do desvio 'n' escolhido pelo usuário. Isso é feito para determinar o limite de escoamento de acordo com as especificações do item 3.3.4. Os desvios constantes da Tabela 2, que estão pré-definidos no arquivo de dados do *software*, também são utilizados nesse cálculo. A Figura 14 exemplifica a curva típica do limite de escoamento.

Esse cálculo é realizado por meio das equações, e o processo de implementação pode ser observado no código que abrange, conforme apresentado na Figura 52.

Figura 52. Código do *software* para cálculo do limite de escoamento

```

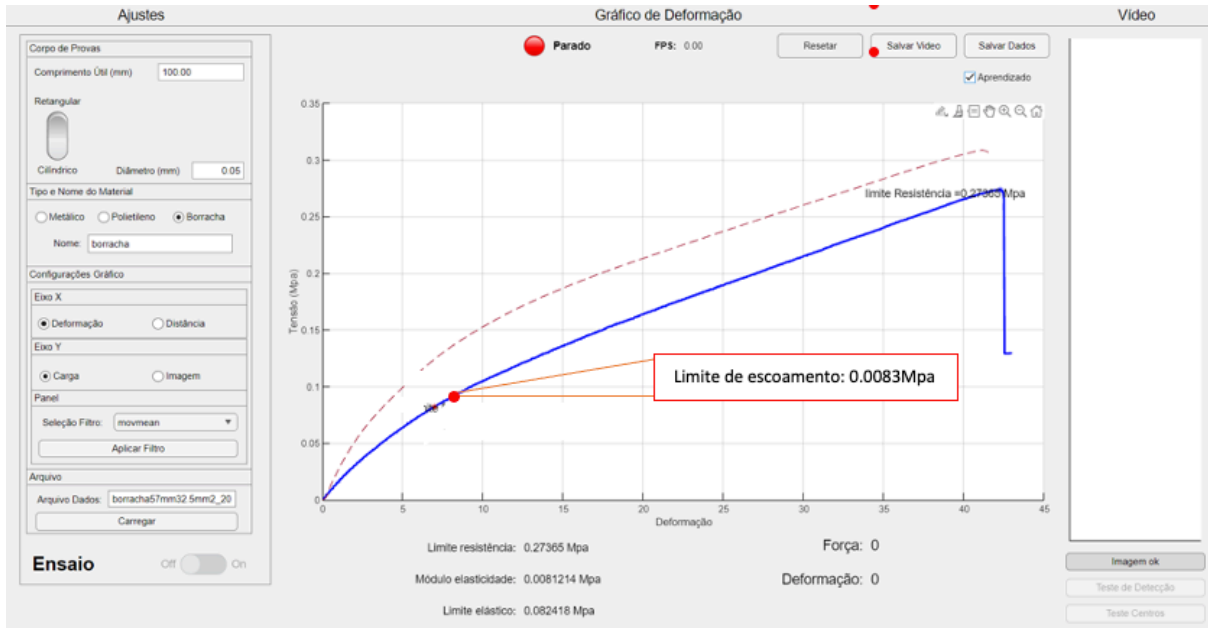
for i = inicio: Comprimento
    Desv = MatrizAlongamento(i) * Myoung;
if matrizCarga(i+AuxFator) <= Desv
    EscoaX = i+AuxFator;
    EscoaY = i+AuxFator;
    Deltamm = MatrizAlongamento(i);
    Carga = matrizCarga(i);
    break
end
end

```

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados são exibidos na área gráfica do *software*, indicando tanto a posição quanto o valor. Isso é ilustrado com um zoom na Figura 53.

Figura 53. Detalhe para o limite escoamento na borracha.



Fonte: Autoria Própria.

#### 5.3.2.4 Função limite de resistência borracha

O *software* calcula o limite de resistência ao buscar a tensão máxima da curva do ensaio, utilizando a função pré-existente "max( )" dentro do ambiente Matlab. Esse cálculo é ilustrado na Figura 54, onde contém a referida função.

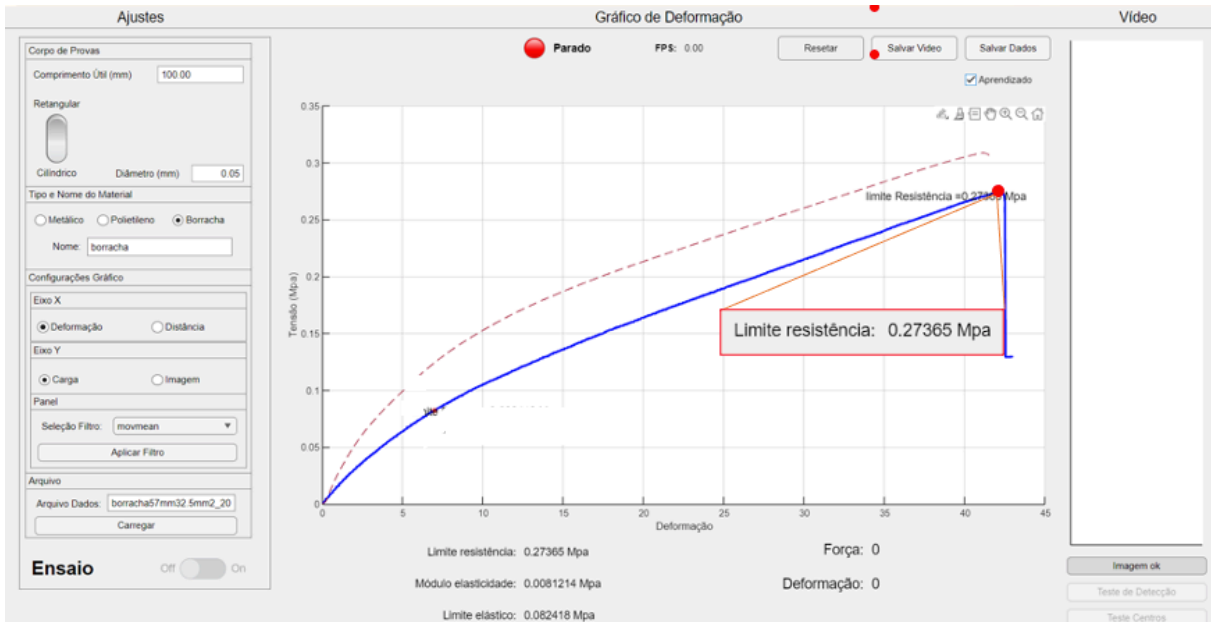
Figura 54. Código do *software* para localização do limite de resistência.

```
% Função limite de resistencia
function [LimiteResX,LimiteResY, PosX] = Resistencia(~, matrizCarga, MatrizAlongamento)
    [LimiteResY,PosX] = max(matrizCarga,[],'linear');
    LimiteResX = MatrizAlongamento(PosX);
end
```

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados são exibidos na área gráfica do *software*, indicando tanto a posição quanto o valor. Isso é ilustrado com um zoom na Figura 55.

Figura 55. Detalhe para limite de resistência.

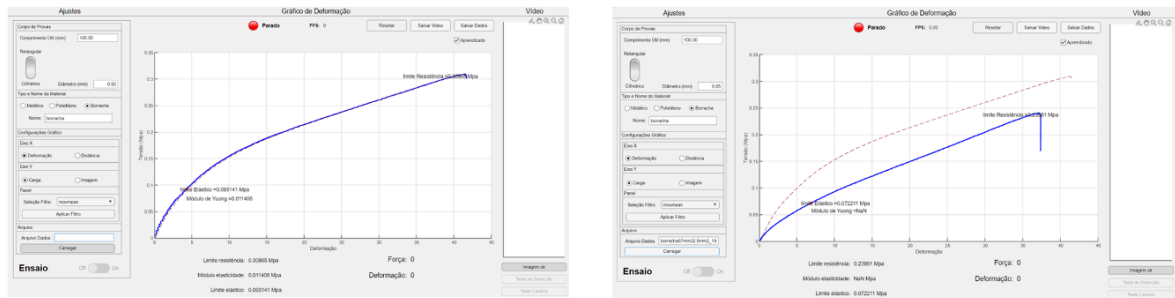


Fonte: Autoria Própria.

### 5.3.2.5 Função curva do aprendizado borracha

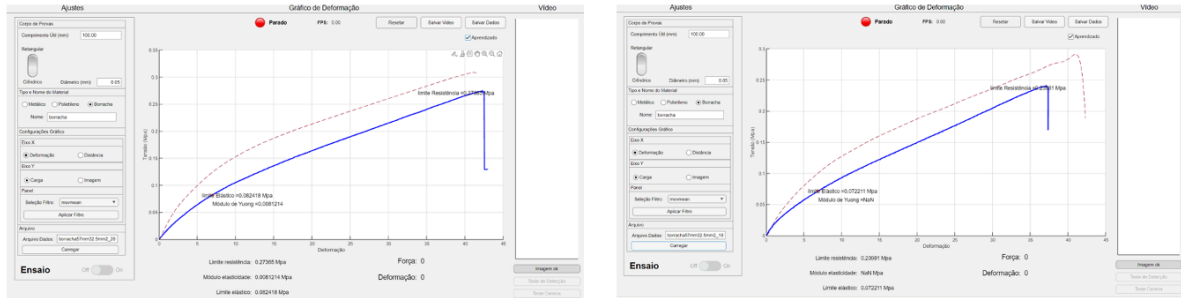
Foram conduzidos diversos ensaios físicos para construir a curva de aprendizado do material de alumínio. Inicialmente, o primeiro ensaio resultou na curva de aprendizado 1. Prosseguindo, um segundo ensaio foi realizado, gerando a curva de aprendizado 2. Através de múltiplos ensaios, uma curva característica do material de referência foi estabelecida. É importante ressaltar que todas as curvas obtidas foram incorporadas a esse padrão. A Figura 56 ilustra esses quatro ensaios de forma sequencial. O ensaio 2 é representado junto à curva de aprendizado 1, seguido pelo ensaio 3 acompanhado da curva de aprendizado 2. Da mesma forma, o ensaio 4 é visualizado com a curva de aprendizado 3, enquanto o ensaio 5 é associado à curva de aprendizado 4.

Figura 56. Curvas dos ensaios em borracha com as respectivas curvas de aprendizado.



Ensaio 2 é representado junto à curva de aprendizado 1

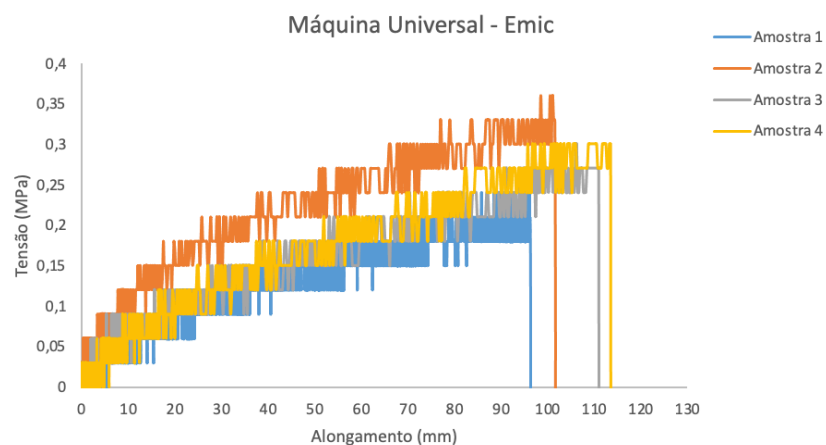
Ensaio 3 é representado junto à curva de aprendizado 2



Fonte: Autoria própria.

Apresentamos as curvas de tensão x deformação dos gráficos plotados, comparando os resultados obtidos no ensaio com o corpo de prova em borracha, tanto na máquina universal, quanto no *software* desenvolvido. A Figura 57, ilustra a curva tensão x deformação no ensaio realizado na máquina universal.

Figura 57. Curva tensão x deformação no ensaio em borracha realizado na máquina universal.



Fonte: Autoria própria

Os resultados dos ensaios físicos realizados no corpo de prova de borracha na máquina universal estão mostrados na Tabela 8 abaixo.

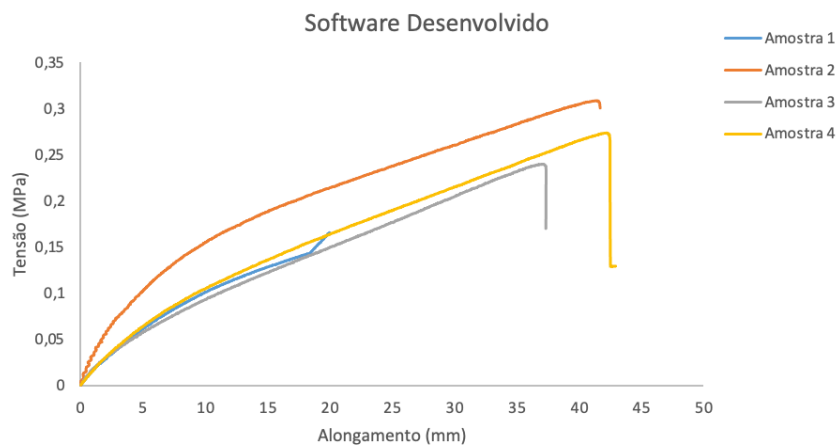
Tabela 8. Resultados dos ensaios físicos pela máquina universal na amostra de borracha.

Ponto	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Módulo de Elasticidade (Young)	0,26	0,57	0,55	0,34
Limite Elástico (MPa)	0,09	0,12	0,06	0,09
Limite de Escoamento (MPa)	0,09	0,12	0,06	0,09
Limite de Resistência (MPa)	0,24	0,33	0,30	0,30
Tensão de Ruptura (MPa)	0,18	0,30	0,27	0,27

Fonte: Autoria própria

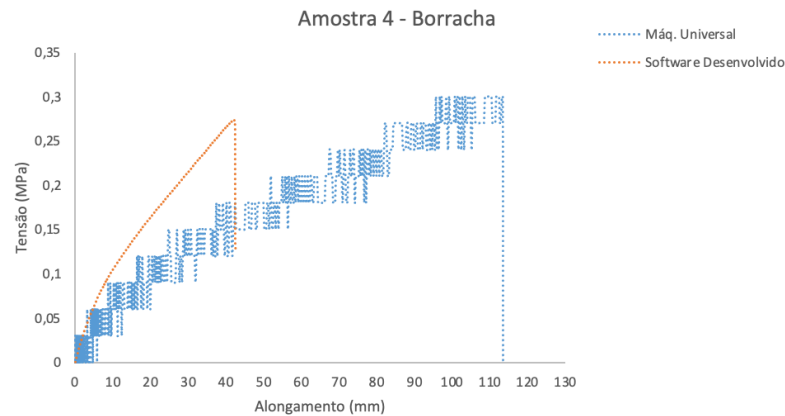
A Figura 58, ilustra a curva tensão x deformação no ensaio realizado em borracha no *software* desenvolvido.

Figura 58. Curva tensão x deformação no ensaio realizado em borracha no *software* desenvolvido.



Apresentamos as curvas de tensão x deslocamento dos gráficos plotados na mesma base, comparando os resultados obtidos no ensaio com o corpo de prova de borracha, tanto na máquina universal, quanto no *software* desenvolvido, conforme demonstrado na Tabela 10 e 11. A Figura 59, ilustra a curva tensão x deformação em borracha na amostra 4.

Figura 59. Curva tensão x deformação em borracha na amostra 4.



Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos na análise da curva do ensaio de tração utilizando o método de processamento de imagens digitais demonstraram um comportamento semelhante aos resultados obtidos na máquina universal. porém, o modelo desenvolvido apresentou similaridade, com uma curva suavizada, melhorando a visualização que comprova a validade e confiabilidade dos resultados obtidos por meio do método de processamento de imagens digitais utilizado neste trabalho, conforme demonstrado na Tabela 10 e 11.

Os resultados dos ensaios físicos realizados no corpo de prova de borracha no vídeo extensômetro desenvolvido estão mostrados na Tabela 9 abaixo.

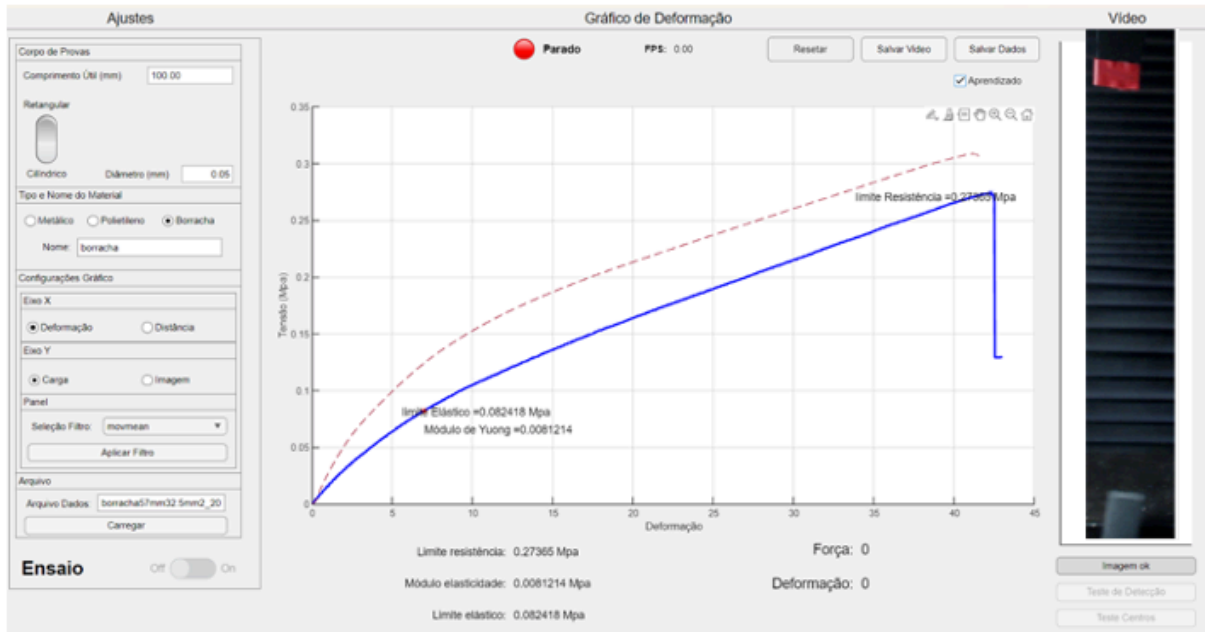
Tabela 9. Resultados dos ensaios físicos pelo vídeo extensômetro desenvolvido na amostra de borracha.

Ponto	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Módulo de Elasticidade (Young)	0,012	--	0,008	--
Limite Elástico (MPa)	0,093	0,072	0,082	0,072
Limite de escoamento (MPa)	0,093	0,072	0,082	0,072
Limite de Resistência (MPa)	0,309	0,241	0,274	0,239
Tensão de Ruptura (MPa)	0,31	0,239	0,252	0,231

Fonte: Autoria própria.

A Figura 60, ilustra os pontos de ensaios físicos: módulo de elasticidade, limite elástico, limite de escoamento, limite de resistência e tensão de ruptura na amostra 4 no corpo de prova de borracha.

Figura 60. Pontos de ensaio físico na amostra 4 de borracha.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida, apresentamos os corpos de prova utilizados no ensaio de tração uniaxial antes e após o teste pela máquina universal. Após o ensaio, os corpos de prova foram retirados da máquina e suas deformações foram registradas para análise posterior. A Figura 61, ilustra os corpos de provas em borracha antes e após os ensaios.

Figura 61. Corpos de prova em borracha antes e após os ensaios.



Fonte: Autoria própria.

E por fim, apresentamos o vídeo do corpo de prova utilizados no ensaio de tração uniaxial no início e no seu rompimento por meio de vídeo sequência. A Figura 62, ilustra as etapas do vídeo em borracha.

Figura 62. Etapas do vídeo no rompimento dos corpos de prova em borracha.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos e a análise comparativa entre os métodos empregados - a máquina universal e o processamento de imagens digitais através do vídeo extensômetro desenvolvido - permitiram concluir que os pontos de Limite de Resistência e Tensão de Ruptura nos ensaios realizados em corpos de prova exibiram um percentual reduzido de erro. Este discernimento é apoiado pela Tabela 10, que detalha os dados dos corpos de prova e demonstra que o erro para o alumínio foi, no máximo, de 4,32%. Notavelmente, a amostra 4 destaca-se ao indicar que o material não é adequado para utilização. No que concerne às amostras de borracha, os valores atingiram, no máximo, 10% na amostra 1, sendo prudente não considerar este ensaio. Este resultado, junto com a análise comparativa, sugere que o método de processamento de imagens digitais pelo vídeo extensômetro desenvolvido proporciona resultados confiáveis e, quando aplicável, revela-se mais sensível a nuances que podem não ser detectadas pela máquina universal. Este discernimento é crucial para aprimorar a compreensão da adequação dos materiais ensaiados, fornecendo insights valiosos para aplicações futuras.

Tabela 10. Erro dos pontos de Limite de Resistência e Tensão de Ruptura.

Amostra	Limite de Resistência (MPa)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Maq. Universal	Software Desenv.	Erro (%)	Maq. Universal	Software Desenv.	Erro (%)
<b>Alumínio</b>						
1	20,13	19,26	4,32	19,89	18,36	2,66
2	26,76	27,29	1,94	26,52	26,43	0,34
3	23,68	23,34	1,44	23,21	22,87	1,46
4	21,31	16,11	24,40	20,84	15,62	25,05
<b>Borracha</b>						
1	0,20	0,18	10,00	0,20	0,18	10,00
2	0,33	0,31	6,06	0,30	0,30	0,00
3	0,27	0,25	7,40	0,25	0,23	8,00
4	0,30	0,28	6,66	0,28	0,27	3,57

Fonte: Autoria própria.

Os resultados colhidos pelo *software* em cada ensaio realizado nos corpos de prova indicado na tela, foram comparados com as planilhas obtidas e a partir daí foram realizados os cálculos matemáticos utilizando as fórmulas para calcular o módulo de elasticidade, que apresentou um percentual baixo de erro. A Tabela 11 ilustra que os resultados foram relevantes, apesar dos desafios na comparação direta entre os resultados obtidos pelo vídeo extensômetro e pela máquina universal. Esses desafios decorrem, principalmente, do potencial divergência na definição dos pontos críticos, como o módulo de elasticidade e o limite elástico, devido às diferentes metodologias empregadas em cada método de medição. Apesar das divergências na abordagem de medição, é encorajador observar que, ao serem avaliados separadamente em relação às suas respectivas referências (*software*, gráfico e banco de dados para o vídeo extensômetro; padrões da máquina universal), os resultados demonstram consistência e conformidade interna. Essa conformidade é verificada quando os resultados são comparados com critérios gerais de qualidade estabelecidos. Essa análise reforça a confiabilidade dos resultados, mesmo diante das diferenças metodológicas, e destaca a conformidade com padrões aceitáveis de qualidade.

Tabela 11. Análise Módulo de Elasticidade e Limite Elástico das amostras.

Amostra	Módulo Elasticidade (MPa)		Limite Elástico (MPa)	
	Maq. Universal	Software Desenv.	Maq. Universal	Software Desenv.
<b>Alumínio</b>				
1	1094,4	76,76	18,60	17,18
2	1163,3	263,60	25,0	23,06
3	1197,0	167,34	21,0	10,62
4	1117,2	84,85	18,70	9,81
<b>Borracha</b>				
1	0,26	0,012	0,09	0,09
2	0,57	-----	0,12	0,07
3	0,55	0,008	0,06	0,08
4	0,34	-----	0,09	0,07

Fonte: Autoria própria.

Verificou-se que além dos resultados já mencionados e discutidos, o custo é um fator importante na implementação e sucesso do modelo que está sendo discutido. O modelo desenvolvido apresenta um custo significativamente mais baixo em comparação com o modelo comercial, com uma diferença de 95,8%, conforme a Tabela 12, que demonstra os valores comparativos de custo do modelo desenvolvido e o comercial. O valor do dólar comercial na data de (19/04/2023) é de \$5.03.

Tabela 12. Valores comparativos de custo do modelo desenvolvido e o comercial.

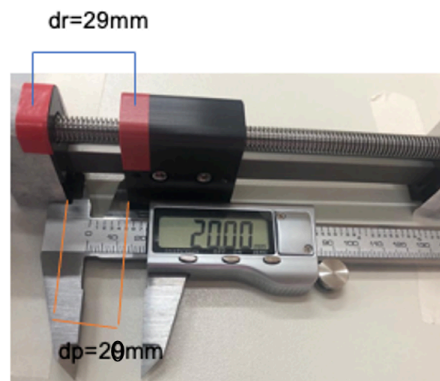
Vídeo extensômetro	Valor - \$	Diferença (%)
Desenvolvido	116.5	
Quantum-I	2800	4,16
RTSS	20000	0,60

Fonte: Autoria própria.

### 5.3.3 Delimitação técnica

Após calibrar o paquímetro na posição inicial (1) com uma medição de 20mm, observou-se que a marcação no prolongador metálico (vermelho) resultou em uma medição real (dr) de 29mm. É importante ressaltar que o *software* realiza a média de centro a centro no ponto vermelho (centroide). A Figura 63 ilustra o início da medição das posições, sendo a posição 1 iniciada em 29mm e a décima quinta posição terminando em 97,01mm. Foi coletado dados em quinze posições distintas para obter uma ampla análise dos resultados.

Figura 63. Posição 1 do paquímetro com o prolongador metálico.

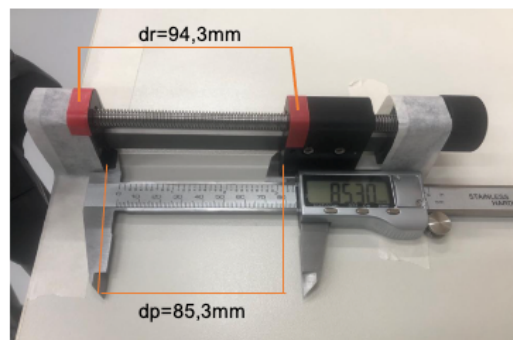


Fonte: Autoria própria.

Após realizar um período de medições na posição 1, procedeu-se o ajuste do regulador metálico para a posição 2, onde a medição real ( $dr$ ) foi de 34,07mm. Foram coletadas cinco medições aleatórias nessa posição. Esse procedimento foi repetido até a posição 15, conforme descrito na Tabela 13.

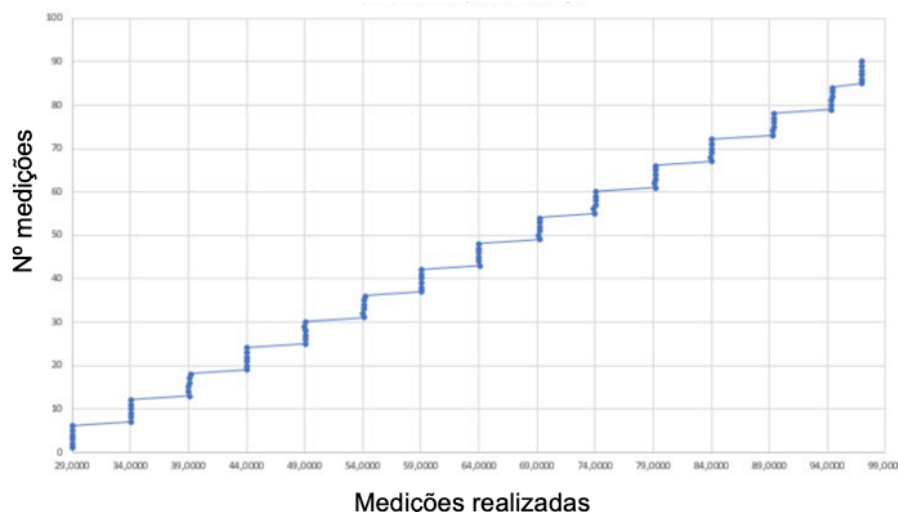
A Figura 64, a seguir, ilustra as medições realizadas na posição 14. E observou-se uma leitura de 85,30mm no paquímetro, porém, ao realizar a medição no centroide, verificou-se uma medição de 94,30mm.

Figura 64. Posição 14 do paquímetro com o prolongador metálico.



Fonte: Autoria própria.

Realizou-se um ensaio físico para verificar a precisão dos resultados do vídeo extensômetro. A Figura 65 ilustra a plotagem do gráfico, na qual foram obtidos os pontos utilizando um paquímetro como referência.

Figura 65. Plotagem dos pontos para verificação da precisão do *software* desenvolvido.

Fonte: Autoria própria.

Após a coleta das quinze posições, foi elaborada a Tabela 13 para análise de precisão das medidas do vídeo extensômetro desenvolvido. Para cada posição, foram coletadas cinco medidas aleatórias. Realizou-se a média, desvio padrão, erro e erro percentual de cada posição, a fim de avaliar se a metodologia utilizada estava coerente com o modelo desenvolvido.

Tabela 13. Medição para precisão das medidas do vídeo extensômetro desenvolvido.

Posição	Medida paquímetro (mm)	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão	Erro	Erro (%)
1	29,0000	29,0159	29,011	29,005	29,007	29,009	29,0096	0,00418	-0,0096	-0,033%
2	34,0700	34,0796	34,0871	34,0869	34,0864	34,043	34,0766	0,01904	-0,0066	-0,019%
3	39,0600	39,0309	39,0245	39,0779	39,1557	39,1586	39,0895	0,06510	-0,0295	-0,076%
4	44,0600	44,0591	44,0224	44,0326	44,0692	44,0197	44,0406	0,02232	0,0194	0,044%
5	49,0700	49,0312	49,0387	49,0311	48,9965	49,0291	49,0253	0,01652	0,0447	0,091%
6	54,0700	53,9673	54,0741	54,1129	54,1529	54,1809	54,0976	0,08331	-0,0276	-0,051%
7	59,0200	59,0472	59,041	59,0508	59,0407	59,0441	59,0448	0,00429	-0,0248	-0,042%
8	64,0500	63,9983	64,0176	64,0267	64,0194	64,0271	64,0178	0,01171	0,0322	0,050%
9	69,2400	69,1562	69,2668	69,2712	69,2668	69,2704	69,2463	0,05040	-0,0063	-0,009%
10	73,9900	73,9094	74,1031	74,1068	74,1127	74,1237	74,0711	0,09075	-0,0811	-0,110%
11	79,2000	79,1483	79,1819	79,169	79,1724	79,2598	79,1863	0,04289	0,0137	0,017%
12	84,0400	83,9378	84,0271	84,0507	84,0527	84,0547	84,0246	0,04979	0,0154	0,018%
13	89,3200	89,2959	89,3751	89,4238	89,4419	89,439	89,3951	0,06161	-0,0751	-0,084%
14	94,3000	94,3204	94,3535	94,3924	94,3958	94,4026	94,3729	0,03507	-0,0729	-0,077%
15	97,0100	96,9271	96,9291	96,9373	96,9288	96,934	96,9313	0,00424	0,0787	0,081%

Fonte: Autoria própria.

Além disso, os erros foram calculados comparando as medidas obtidas com os valores esperados ou desejados. Esses erros podem indicar a presença de

imprecisões sistemáticas ou aleatórias nas medições. Os erros em percentual foram calculados para permitir uma avaliação relativa das discrepâncias entre as medições e os valores esperados, fornecendo uma perspectiva mais abrangente da precisão do vídeo extensômetro.

Essa análise detalhada dos resultados coletados na Tabela 13 foi importante para avaliar a confiabilidade e a consistência das medições realizadas pelo vídeo extensômetro desenvolvido. Com base no *hardware* utilizado e nas especificações descritas na seção 4.1, foi possível delimitar que a taxa de aquisição média foi de 60 FPS e a precisão de deslocamento real foi de 0,00418 mm, conforme indicado na Tabela 13.

Tomando como exemplo a posição 1, com uma leitura de 29,00 mm no paquímetro, é possível inferir que as medições foram bastante precisas, pois o desvio padrão é relativamente baixo (0,00418 mm). Além disso, o erro de 0,033% também é relativamente pequeno em comparação com um paquímetro digital, o que sugere que as medições foram confiáveis e próximas da média padrão.

Esses resultados apontam para uma sólida coerência entre a metodologia empregada e o modelo desenvolvido, fortalecendo, assim, a confiabilidade e a precisão do vídeo extensômetro. Contudo, uma das limitações identificadas no projeto está relacionada à desafio enfrentado pelo sistema ou software desenvolvido ao tentar alcançar uma precisão satisfatória em situações de baixos alongamentos. Nesses casos, observou-se uma taxa de erro de 1mm, indicando que medidas abaixo desse valor de alongamento não podem ser consideradas totalmente confiáveis.

#### 5.4 NIVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA (TRL/MLR)

TRL é uma ferramenta valiosa para comunicar o estado de desenvolvimento tecnológico e a prontidão para a implementação. O uso do TRL nos auxilia a transmitir claramente o estágio atual do trabalho e os próximos passos necessários para amadurecer ainda mais a tecnologia. O trabalho encontra-se no estágio de TRL 5, alcançando um marco significativo no desenvolvimento da tecnologia. Durante essa fase, foram realizados ensaios rigorosos com diversos materiais, tanto computadores de mesa quanto notebooks, por meio de máquina universal. Os resultados obtidos foram fundamentais para avaliar o desempenho e a robustez da tecnologia em condições simuladas do mundo real. Uma análise detalhada dos resultados revelou várias conclusões importantes. Primeiramente, observamos que o *software*

respondeu de maneira consistente e confiável em ambas as plataformas de *hardware*, demonstrando uma adaptação bem-sucedida. Além disso, os ensaios com diferentes materiais permitiram verificar a versatilidade e a capacidade da tecnologia de lidar com uma variedade de situações. Os testes realizados com a máquina universal forneceram informações cruciais sobre a resistência, durabilidade e eficácia da tecnologia em um ambiente de simulação. Observamos que o desempenho atendeu e superou nossas expectativas em vários aspectos, o que é promissor para a futura implementação. No entanto, também identificamos áreas que requerem aprimoramento. Algumas limitações foram observadas em materiais duros. Essas descobertas destacam a necessidade de refinamentos técnicos adicionais à medida que avançamos para níveis de maturidade tecnológica mais elevadas. Os resultados do TRL 5 validaram a eficácia geral da tecnologia, preparando-nos para enfrentar os desafios do mundo real com maior confiança e determinação. À medida que nos preparamos para a próxima etapa do TRL 6, que envolverá testes em um ambiente real, estamos confiantes de que as lições aprendidas e os resultados obtidos até agora nos guiarão no aprimoramento contínuo da tecnologia.

## 6 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido alcançou o objetivo geral e os objetivos específicos delineados, permitindo a identificação das propriedades mecânicas dos biomateriais, como o módulo de elasticidade, limite elástico, limite de escoamento, limite de resistência e tensão de ruptura, em ensaios físicos. O software proporcionou as funcionalidades desejadas, como gravação de ensaios, interface visual, parametrização e aumento da confiabilidade dos dados, geração de gráficos de deformação pela tensão, e análise de deformações localizadas e pontos críticos, conforme especificado nos objetivos específicos. Além disso, a facilidade de manipulação e acesso do software destaca-se, sendo plenamente funcional em ambientes variados, desde condições de elevadas temperaturas até ambientes de baixa temperatura, correspondendo ao propósito de criar um software destinado a instituições de ensino e pesquisa nacionais.

A validação dos resultados, mediante os ensaios físicos realizados na máquina universal, corroborou a congruência entre os dois métodos de diagnóstico, atingindo a meta de desenvolver e validar a eletrônica de aquisição de valores de força. Os ensaios físicos demonstraram uma precisão de deslocamento real de 0,00418 mm e erros menores que 0,033%, valores relativamente pequenos se comparados com o paquímetro digital. Nos ensaios de alumínio, os pontos de limite de resistência e tensão de ruptura apresentaram um erro máximo de 4,32% e 2,66% respectivamente; quanto ao módulo de elasticidade, a discrepância entre o valor medido pelo software desenvolvido e o valor fornecido pela literatura foi de, no máximo, 0,002%.

Uma das limitações identificadas no projeto reside na dificuldade do sistema ou software desenvolvido em alcançar uma precisão satisfatória em baixos alongamentos, sendo a taxa de erro de 1 mm, indicando que medidas abaixo desse valor de alongamento não são consideradas confiáveis. Este desafio destaca uma área promissora para futuras melhorias, demandando uma atenção específica na otimização da precisão do sistema em faixas de baixo alongamento. O aprimoramento nesse aspecto não apenas elevaria a confiabilidade das medições em baixos alongamentos, mas também fortaleceria a eficácia global do sistema.

Uma distinção entre o vídeo extensômetro desenvolvido e um comercial reside no custo de implementação, fator importante para o sucesso do modelo discutido, demonstrando ser uma alternativa eficiente para a análise das propriedades dos materiais através do vídeo extensômetro dos corpos de prova. O projeto também

alcançou um nível de maturidade tecnológica (TRL) de cinco. Além disso, exibe um alto potencial de sucesso comercial, posicionando-se como uma alternativa viável e competitiva no mercado de extensômetros para análise de propriedades dos materiais biomédicos.

Com base nesses resultados, espera-se que este trabalho possa contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas e métodos de análise mais precisos e eficazes, promovendo avanços na área de materiais biomédicos. Em suma, espera-se que este trabalho sirva como um ponto de partida para pesquisas subsequentes e inspire o desenvolvimento contínuo de soluções mais avançadas em materiais biomédicos.

## 7 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Vigilância Sanitária. ANVISA. Engenharia clínica como estratégia na gestão hospitalar. N. 5, cap. 4, p. 13, 2000b. Disponível em: <https://portal.anvisa.gov.br/documents/33868/327133/capitulo4.pdf/43bf4713-c4f0-4016-85c0-b4237239d401>. Acesso em: 20 out. 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 6892. Ensaio de tração à temperatura ambiente, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 6892. Informação e documentação: sumário: apresentação. Rio de Janeiro: [s.n.].

ADDIEGO, F. et al. Characterization of volume strain at large deformation under uniaxial tension in high-density polyethylene. *Polymer (Guildf)*, v. 47, n.12, p. 4387-4399, 2006.

AGUILÓ, J.; MILLÁN, J.; VILLA, R. Micro and Nano Technologies in Medical Applications: A Challenge . In: SEMICONDUTOR CONFERENCE (Oct. 2001 : Spain). Proceedings. Spain, 2001, p.247-251.

ALBUQUERQUE, E. M. Pesquisa e Inovação em Saúde: Uma Discussão a Partir da Literatura sobre Economia da Tecnologia. In: *Ciência & Saúde Coletiva*. Associação Brasileira de Pós-Graduação em Saúde Coletiva. v.9 n.2, abr./jun. 2004, p.277-294.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM Standard E8/E8M-13a, v. i, p. 1-27, 2013.

ANTONIO, A. M. A Bioengenharia no Brasil, Século XX: Estado da Arte. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos/ Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto/ Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/82/82131/tde-28062005-101940/en.php>. Acesso em: 05 set. 2023.

AZEVEDO, Á. Método dos elementos finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade, Undefined. Disponível em: [https://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/livro\\_mef\\_aa.htm](https://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/livro_mef_aa.htm). Acesso em: 10 mar. 2003.

BAI P; ZHU F; X HE. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions. *Opt. Lasers Eng.*, v. 65, p. 28–37, 2015.

BEER, F. et al. Mecânica dos materiais. ed. McGraw-Hill, 2011. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/428261902/Mecanica-dos-Materiais-5-Ed-Beer-Johnston-DeWolf-Mazurek>. Acesso em: 05 jul. 2022.

BROGGIO, J. R. Desenvolvimento de software para análise e simulação de ensaio de tração aplicado na Engenharia Biomédica. São Paulo: Universidade Brasil, 2022.

BRONZINO, J. D. The Biomedical Engineering Handbook . 2. ed. USA: CRC Press, Inc,1995.

BRONZINO, J. D. (2017). Clinical engineering: evolution of a discipline. Burlingto: Elsevier academic press. Disponível em: [https://www.inf.ufpr.br/Imperes/2017\\_2/ci167/no\\_exam/the\\_clinical\\_engineering\\_han\\_dbook\\_joseph\\_dyro.pdf](https://www.inf.ufpr.br/Imperes/2017_2/ci167/no_exam/the_clinical_engineering_han_dbook_joseph_dyro.pdf) . Acesso em: 21 out. 2023.

BUTTER, C.; OPTICS, G. H.-A. Fiber optics strain gauge. Opg.optica.org, 1978. Disponível em: <https://sci-hub.se/10.1364/AO.17.002867>. Acesso em: 05 abr.2023.

CALLISTER JR, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

CASCARDO C, A.; PABLO, A.; BARBERO, L. Princípio de funcionamento dos sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas e sua importância nas diferentes áreas tecnológicas. Periodicos.uff.br, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.22409/engevista.v16i4.574>. Acesso em: 03 abr.2023.

CHANG, C. Development of Fiber-Optic Sensor Networks for Transportation Infrastructure. Rev. científica Sensors, 2010. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/1212346>. Acesso em: 10 abr. 2023.

CHEN, F. et al. Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system. Opt. Lasers Eng., v. 51, n.9, p. 1044 -1052, 2013. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816613000869?via%3Dihub>. Acesso em: 12 jan. 2023.

CIRCUITAR. Disponível em: <https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/base-boarduino/index.html>. Acesso em: 06 fev. 2022.

CIRCUITAR. Disponível em: <https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/load-cell/index.html>. Acesso em 06 fev. 2022.

COLLEGES, R. T.J. OF C. S. Encouraging undergraduate research: a digital image processing approach. Dl.acm.org, 2005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/249612020\\_Encouraging\\_undergraduate\\_research\\_a\\_digital\\_image\\_processing\\_approach](https://www.researchgate.net/publication/249612020_Encouraging_undergraduate_research_a_digital_image_processing_approach). Acesso em: 06 fev. 2023.

DA CUNHA, J. C., FERLIN, E. P. , PILLA JÚNIOR, V. O Desenvolvimento de Pesquisas em Engenharia Biomédica no Nível de Graduação no Unicen P. WCETE 2004 - World Congress on Engineering and Technology Education, p. 1-4, 2004. Disponível em: <https://bit.ly/36AJ3G7>. Acesso em 21 out. 2023.

DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, PEB Programa. Definindo Engenharia Biomédica. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2011. Disponível em: <https://www.peb.ufrj.br/index.php/pt/inicio/apresentacao>. Acesso em 21 out. 2023.

DIÓGENES, H. J. F. et al. Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. SciELO Brasil, v. 4, n. 5, p. 792-813, 2011.

ELIAS, M. A.; NAVARRO, V. L. (2006). A relação entre o trabalho, a saúde e as condições de vida: negatividade e positividade no trabalho das profissionais de enfermagem de um hospital escola. *Revista Latino Americana de Enfermagem*, v. 14, n. 4, p. 517-25.

EMIC. Catálogo Emic. São José dos Pinhais, EMIC, 1969.

EMIC. Instron - EMIC. Disponível em: <https://www.instron.com/pt-br/products/testing-accessories/extensometers/automatic>. Acesso em: 5 set. 2023.

ENGENHARIA, M. D. DE. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Apostila de Extensometria GRANTE. 2004. Disponível em: <https://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>. Acesso em: 03 maio 2022.

ENSUS. Advanced Engineering. Disponível em: <https://ensus.com.br/extensometria-strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/>. Acesso em: 06 set. 2023.

FÉLIX, C. M. da S. Monitorização e análise do comportamento de obras de arte. Porto: Editora FE ed. [s.l.] Universidade do Porto (Portugal), 2010.

FELLING, A.; ENGINEERING, D. A new video extensometer system for testing materials undergoing severe plastic deformation. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME* 140(3). Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4039291>. Acesso em: 04 maio. 2023.

FERNANDES, T. M. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/tensao-mecanica/>. Acesso em: 06 set. 2023.

FERNANDES, M. T. O., SILVA, I. B., & Soares, S. M. (2011). Utilização de tecnologias no trabalho com grupos de diabéticos e hipertensos na saúde da família. *Ciência e saúde coletiva*, 1(16), 1331-1340, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/7bn6vqmgrzrfqgqw4ycqhqy/citation/?lang=pt>. Doi: 10.1590/s1413-81232011000700067. Acesso em 21 out. 2023.

FIALHO, A. Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises. Disponível em: <https://encurtador.com.br/dxLZ2>. Acesso em: 5 jun. 2022.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. dos. *Ensaio dos materiais*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2012.

GENOVESE, K. et al. Stereo-digital image correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism. *Opt. Lasers Eng.*, v. 51, n.3, p. 279-285, 2013.

GENOVESE, K. et al. A 360-deg digital image correlation system for materials testing. *Opt. Lasers Eng.*, v. 82, p.127-134, 2016.

GORJI, M.; MATERIALIA, D. M. Micro-tension and micro-shear experiments to characterize stress-state dependent ductile fracture. *Acta Mater*, v. 131, p. 65–76, 2017.

HAMILTON, O. H. The American Mathematical Society. *Science*, v. 51, n.1316, p. 300, 1920.

HAO, Z. et al. Measurement of multiple mechanical properties for polymer composites using digital image correlation at elevated temperatures. Elsevier, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520308856>. Acesso em: 05 ago. 2023.

HIBBELER, R. Resistência dos materiais. 3. ed. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/Meireles01/resistncia-dos-materiais-r-c-hibbeler-53169626>. Acesso em: 02 fev. 2023.

HOFFMANN, K. An introduction to measurements using strain gages. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/383711718/An-Introduction-to-Measurements-using-Strain-Gages>. Acesso em: 31 jan. 2023.

IFJU.P.G. Experimental mechanics. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=TcdgLBVCoOIC&oi=fnd&pg=PR7&dq=+P.+Ifju+,+1990,++Experimental+Mechanics,+Volume+30,+N%C3%BAmero+2.&ots=J6SFNYmVQS&sig=XSxRSg1JRvmmdkj3xf9HetMSTd0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 16 abr. 2023.

INSTRON. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/instron/product-18463-2084767.html>. Acesso em: 05 set. 2023.

KUNKEL, M.E.; CANO, A.P.D.; GANGA, T.A.F.; ARTIOLI, B.O.; JUVENAL, E.A.O. Manufatura Aditiva do Tipo FDM na Engenharia Biomédica. In: Maria Elizete Kunkel. (Org.). Fundamentos e Tendências em Inovação Tecnológica: v.1, 1ed. Seattle, United States: Kindle Direct Publishing, 2020, p. 50-69.

LIANG, Z. et al. Studies on deformation measurement with non-fixed camera using digital image correlation method. Measurement, v.167, p.108 -139, jan. 2021.

LIDER. Lider balanças. Disponível em: <https://www.liderbalancas.com.br/produtos/celula-de-carga-cs/>. Acesso em: 16 abr. 2022.

LILJENHJERTE, J.; UPADHYAYA, P.; KUMAR, S. Hyperelastic strain measurements and constitutive parameters identification of 3d printed soft polymers by image processing. Addit. Manuf., v. 11, p. 40-48, 2016.

LIM, K. et al. New extensometer to measure in vivo uniaxial mechanical properties of human skin. J. Biomech. 41, p. 931-936, 2008.

LOGITECH. Logitechstores. Disponível em: <https://www.logitechstore.com.br/camera-webcam-full-hd-logitech-c920>. Acesso em: 04 abr. 2022.

MACHADO, G. S. Órteses e próteses no Sistema Único de Saúde. Estudo Técnico. 2018. Disponível em: [file:///Users/AntonioCarlos/Downloads/ortese\\_protese\\_machado.pdf](file:///Users/AntonioCarlos/Downloads/ortese_protese_machado.pdf). Acesso em: 21 out. 2023.

MANKINS, J. Technology readiness levels: a white paper. Disponível em: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology\\_readiness\\_level](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level). Acesso em: 09 maio 2023.

MANO, E. Polímeros como materiais de engenharia. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=qeuyDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=qeuyDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 12 abr.2022.

MATHWORKS. MATLAB. El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink”. Disponível em: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 02 jan.2023.

MEASUREX. MeasureXPty. Disponível em:<https://www.directindustry.com/pt/prod/measurex-pty-ltd/product-161342-1667716.html>. Acesso em: 06 set. 2023.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology\\_readiness\\_level](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level). Acesso em: 04 maio 2023.

NOLTE W. Readiness level. Disponível em: <https://login.semead.com.br/24semead/anais/arquivos/1008.pdf?>. Acesso em: 09 maio 2023.

PAIVA, T. S. et al. Desenvolvimento de um dispositivo para acionamento de joystick de cadeira de rodas motorizada. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/30422>. Acesso em 21 out. 2023.

PAN, B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. Measurement Science and Technology, v. 29, n. 8, p. 082001, 28 jun. 2018.

PAN, B.; YU, L.; WU, D. L. T. Systematic errors in two-dimensional digital image correlation due to lens distortion. Optics and Lasers in Engineering, v. 51, n. 2, p. 140-147, 2013.

PEIPONEN, K. E.; KAI-E.; MYLLYLÄ, R.; PRIEZZHEV, A. V. Optical measurement techniques innovations for industry and the life sciences. Heidelberg. Springer, 2009, p. 155. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=UF1zj6n9JHsC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=UF1zj6n9JHsC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 12 abr.2023.

PIERNAS, R. et al. Extensometria básica. Feis.unesp.br, 2004. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2023.

PORTINOI, M. Extensometria. Disponível em: <https://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>. Acesso em: 05 set. 2023.

PTS. Primo Trade Solutions. Disponível em: <https://www.primotradesolutions.com/product-page/extensometro-sem-contato-otico-e-laser-epsilon>. Acesso em: 06 set. 2023.

PTS. Primo Trade Solutions. Disponível em <https://www.primotradesolutions.com/product-page/extensometro-sem-contato-laser-epsilon>. Acesso em: 06 set. 2023.

PRINCE, Jerry L.; LINKS, Jonathan M. Medical imaging signals and systems. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2006.

REIS, G. de M.; TONETE, R. J.; NOGUEIRA, R. Desenvolvimento de extensômetro para ensaio mecânico de tração. Disponível em: <https://encurtador.com.br/IKL56>. Acesso em: 06 set. 2023.

RST.rstinstruments. Disponível em: <https://www.beemetry.com/galga-extensometrica-de-cuerda-vibrante-de-rst-instruments/>. Acesso em: 06 set. 2023.

SALMÁN, A. K. G. Análisis experimental de deformaciones mediante video-extensometría. Informes de la construcción, 2020. Disponível em: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8931/tfg-gui-ana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 abr. 2022.

SALTZMAN, W. Mark. Biomedical engineering: bridging medicine and technology. Cambridge University Press, 2009. Disponível em: [https://scholar.google.com.br/scholar?q=saltzman%2c+w.+mark.+biomedical+engineering%3a+bridging+medicine+and+technology.+cambridge+university+press%2c+2009+&hl=pt-br&as\\_sdt=0%2c5&as\\_ylo=2009&as\\_yhi=](https://scholar.google.com.br/scholar?q=saltzman%2c+w.+mark.+biomedical+engineering%3a+bridging+medicine+and+technology.+cambridge+university+press%2c+2009+&hl=pt-br&as_sdt=0%2c5&as_ylo=2009&as_yhi=). Acesso em: 21 out. 2023.

SANTOS, F. J. Introdução às séries de fourier. Disponível em: [https://www.academia.edu/43415589/Introdu%C3%A7%C3%A3o\\_%C3%A0s\\_S%C3%A9ries\\_de\\_Fourier](https://www.academia.edu/43415589/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0s_S%C3%A9ries_de_Fourier). Acesso em: 12 set. 2022.

SANTOS, F. dos. Uso de extensômetros para altas temperaturas na estimativa de vida residual-monitoração em tempo real das deformações de tubulações em usinas de geração térmica, 2011. Disponível em: [http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe\\_m/FernandaFigueiredoMartinsDosSantos.pdf](http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/FernandaFigueiredoMartinsDosSantos.pdf). Acesso em: 08 ago. 2022.

SHAKEEL, M. et al. Fabrication of cost effective and high sensitivity resistive strain gauge using DIW technique. Elsevier, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424716311761>. Acesso em: 15 abr. 2023.

SHAO, J. et al. Research on the optical video extensometer with large field of view and high accuracy. spiedigitallibrary.org, 2023. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12550/2667466/Research-on-the-optical-video-extensometer-with-large-field-of-view/10.1117/12.2667466.short>. Acesso em: 15 abr. 2023.

SHARPE, W. Springer handbook of experimental solid mechanics. 2008. Disponível em: [https://www.academia.edu/17227046/Springer\\_Handbook\\_of\\_Experimental\\_Solid\\_Mechanics](https://www.academia.edu/17227046/Springer_Handbook_of_Experimental_Solid_Mechanics). Acesso em: 15 abr. 2023.

SOMBRA, T. N. Aplicação do ensaio de ressonância acústica na caracterização mecânica de unidades de alvenaria estrutural. 2020. Disponível em: [http://sistemas.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2020ME\\_ThomasNunesSombra.pdf](http://sistemas.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2020ME_ThomasNunesSombra.pdf). Acesso em: 07 abr. 2023.

SOUZA, S. DE. Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos. Local: LTC, 2010. Disponível em: [https://www.academia.edu/33566639/Livro\\_Fundamentos\\_Ensaio\\_Mecanicos\\_de\\_Materiais\\_Metalicos\\_Autor\\_Souza\\_Editora\\_Edgar\\_Blucher\\_5\\_edicao](https://www.academia.edu/33566639/Livro_Fundamentos_Ensaio_Mecanicos_de_Materiais_Metalicos_Autor_Souza_Editora_Edgar_Blucher_5_edicao). Acesso em: 05 ago. 2022.

SUTTON, M. A. et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Opt. Lasers Eng.*, v. 46, n. 10, p. 746–757, 2008.

TRINDADE, M. M. Desenvolvimento de um sistema de comando e aquisição de dados de uma máquina universal de ensaios. 2019. Disponível em: <file:///Users/AntonioCarlos/Downloads/345546.pdf>. Acesso em: 05 set. 2002.

VOELZ, A. Estudo sobre a utilização de extensômetros elétricos para a análise experimental de estruturas de concreto armado. *Rev. IBRACON Structures and Materials Journal*, 2010. Disponível em: <http://repositorio.unisc.br:8080/jspui/handle/11624/2514>. Acesso em: 14 set. 2022.

WANG, R. et al. Analysis and optimization of the stereo-system with a four-mirror adapter. *Jeos.org*, v.3, p. 8033, 2008.

WARDLOW, J.; ALLAMEH, S. On the micromechanical characterization of metallic MEMS by a hybrid Microtester. *asmedigitalcollection.asme.org*, v. 10, 2015. Disponível em: <https://sci-hub.se/10.1115/IMECE2015-50942>. Acesso em: 14 set. 2022.

WEBER, A. L. Metrologia e instrumentação - extensometria. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/apostila-de-extensometria/4709795/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

WEMMING, H. et al. Identification of bearing failure in composite-aluminium bolted joints using digital image correlation. *Composite Structures*, v. 300, p. 116072. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382232200811X>. Acesso em: 15 nov. 2022.

WINDLIN, F. L. S. J. J. de. Extensometria. Material didático do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Santa Cecília – USC. Disponível em: <https://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>. Acesso em: 07 set. 2023.

WJ. Componentes eletrônicos. Disponível em: [https://www.wjcomponentes.com.br/arduino-mega-r3?parceiro=6298&gclid=CjwKCAjwu4WoBhBkEiwAojNdXIUnTUIESNnQJVgLG1tEDXRAvt7XCxaau\\_62fSxb4sHfhTplHitlxoCtrlQAvD\\_BwE](https://www.wjcomponentes.com.br/arduino-mega-r3?parceiro=6298&gclid=CjwKCAjwu4WoBhBkEiwAojNdXIUnTUIESNnQJVgLG1tEDXRAvt7XCxaau_62fSxb4sHfhTplHitlxoCtrlQAvD_BwE). Acesso em: 06 fev. 2022.

YIN, F.; TOMPKINS, W. K. P. I. T. ON. A video-dimension analyzer. *ieeexplore.ieee.org*, v. BME-19, n o 5, p. 376–381, set. 1972.

YU, L.; PAN, B. Full-frame, high-speed 3D shape and deformation measurements using stereo-digital image correlation and a single color high-speed camera. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 95, p. 17–25, 01 ago. 2017.

ZHANG, Q. M.; PAN, W. Y.; CROSS, L. E. Laser interferometer for the study of piezoelectric and electrostrictive strains. *Journal of Applied Physics*, 63(8), p. 2492-2496, 2004.

ZHONG, F. Q.; INDURKAR, P. P.; QUAN, C. G. Three-dimensional digital image correlation with improved efficiency and accuracy. *Measurement*, v. 128, p. 23–33, 1 nov. 2018.

## 8 ANEXO A – CÓDIGO DO ARDUINO

```
int ABEM = 0;
```

### Código Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <Nanoshield_ADC.h>
#include <SPI.h>
#include <Nanoshield_LoadCell.h>
#include "TimerOne.h"
#include <NewTone.h>
#include <EEPROM.h>
```

```
String VA0; //Variável que recebe a string velocidade de ajuste
String VE0; //Variável que recebe a string velocidade de ensaio
unsigned int VA1; //Variável que converte a string velocidade de ajuste em inteiro
unsigned int VE1; //Variável que converte a string velocidade de ensaio em inteiro
```

```
String MC1M0, MC2M0, MC3M0, MC4M0, MC5M0, MC6M0, MC7M0, MC8M0,
MC9M0, MC10M0, MC11M0, MC12M0, MC13M0, MC14M0, MC15M0, MC16M0,
MC17M0, MC18M0, MC19M0, MC20M0, MC21M0, MC22M0, MC23M0, MC24M0,
MC25M0, MC26M0, MC27M0, MC28M0, MC29M0, MC30M0; //Variável que recebe
a string velocidade de ensaio
unsigned int MC1M1, MC2M1, MC3M1, MC4M1, MC5M1, MC6M1, MC7M1,
MC8M1, MC9M1, MC10M1, MC11M1, MC12M1, MC13M1, MC14M1, MC15M1,
MC16M1, MC17M1, MC18M1, MC19M1, MC20M1, MC21M1, MC22M1, MC23M1,
MC24M1, MC25M1, MC26M1, MC27M1, MC28M1, MC29M1, MC30M1; //Variável
que converte a string velocidade de ajuste em inteiro
```

```
byte byteRead;
```

```
byte value0;
byte value1;
unsigned int value;
```

```
int PUL = 3;
int DIR = 4;
int ENA = 5;
int FCI = 0;
int FCS = 0;
int BEM = 0;
int BSO = 0;
int BDE = 0;
int BHO = 0;
int BZE = 0;
int CC1 = 0;
int CC2 = 0;
int CC3 = 0;
int CC4 = 0;
```

```
int AFCI = 0;
int AFCS = 0;
int ABSO = 0;
int ABDE = 0;
int ABHO = 0;
int ABZE = 0;
int ACC1 = 0;
int ACC2 = 0;
int ACC3 = 0;
int ACC4 = 0;
```

```
int MAFCS = 0;
int MAFCI = 0;
int MALCCI = 0;
int MALCCS = 0;
int MAE = 0;
float MAES = 0;
float MAEI = 0;
```

```
int MARAMA = 0;
int MARAME = 0;
```

```
int MABSOON = 0;
int MABSOOFF = 0;
int MABDEON = 0;
int MABDEOFF = 0;
```

```
int CELULA = 0;
int ECELULA = 0;
int ERRO = 0;
unsigned int ERROCONEXAO = 0;
int AUXCONEXAO = 0;
```

```
int LCC = 0;
int LCCI = 0;
int LCCS = 0;
```

```
int direcao = 0;
```

```
int channel = 0;
int i;
int x;
float forca;
long int freq = 0;
int it = 0;
```

```
int pin = 2;
int pin_irq = 0;
```

```
int datos = 0;
```

```
byte dato1[1];
byte dato2[1];
```

```
volatile long int IRQcount;
volatile long int AUXIRQcount;
```

```
Nanoshield_LoadCell loadCell(200000, 2, 8, true, 1);
```

```
Nanoshield_ADC adc[4] = { 0x48, 0x49, 0x4A, 0x4B };
```

```
void setup()
{
```

```
  pinMode(PUL, OUTPUT); // configura pino como saída
  pinMode(DIR, OUTPUT); // configura pino como saída
  pinMode(ENA, OUTPUT); // configura pino como saída
```

```
  pinMode(39, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
  pinMode(37, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
```

```
  pinMode(49, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
```

```
  pinMode(47, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
  pinMode(45, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
  pinMode(43, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
  pinMode(41, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
```

```
  pinMode(48, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
  pinMode(46, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
  pinMode(44, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
  pinMode(42, INPUT_PULLUP); // configura pino como entrada pull up
```

```
value0 = EEPROM.read(0); value1 = EEPROM.read(1); MC1M1 = value0 +(value1
* 256);
```

```
value0 = EEPROM.read(2); value1 = EEPROM.read(3); MC2M1 = value0 +(value1
* 256);
```

```
value0 = EEPROM.read(4); value1 = EEPROM.read(5); MC3M1 = value0 +(value1
* 256);
```

```
value0 = EEPROM.read(6); value1 = EEPROM.read(7); MC4M1 = value0 +(value1
* 256);
```

```
value0 = EEPROM.read(8); value1 = EEPROM.read(9); MC5M1 = value0 +(value1
* 256);
```

```
value0 = EEPROM.read(10); value1 = EEPROM.read(11); MC6M1 = value0
+(value1 * 256);
```

```
value0 = EEPROM.read(12); value1 = EEPROM.read(13); MC7M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(14); value1 = EEPROM.read(15); MC8M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(16); value1 = EEPROM.read(17); MC9M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(18); value1 = EEPROM.read(19); MC10M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(20); value1 = EEPROM.read(21); MC11M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(22); value1 = EEPROM.read(23); MC12M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(24); value1 = EEPROM.read(25); MC13M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(26); value1 = EEPROM.read(27); MC14M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(28); value1 = EEPROM.read(29); MC15M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(30); value1 = EEPROM.read(31); MC16M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(32); value1 = EEPROM.read(33); MC17M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(34); value1 = EEPROM.read(35); MC18M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(36); value1 = EEPROM.read(37); MC19M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(38); value1 = EEPROM.read(39); MC20M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(40); value1 = EEPROM.read(41); MC21M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(42); value1 = EEPROM.read(43); MC22M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(44); value1 = EEPROM.read(45); MC23M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(46); value1 = EEPROM.read(47); MC24M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(48); value1 = EEPROM.read(49); MC25M1 = value0
+(value1 * 256);
value0 = EEPROM.read(50); value1 = EEPROM.read(51); MC26M1 = value0
+(value1 * 256);
```

```
MARAMA = (MC16M1 / 1000);
MARAME = (MC16M1 / 1000)*(-1);
```

```
VA1 = MC16M1 * 0.5;
```

```
Serial.flush();
Serial.begin(115200);
```

```
loadCell.begin();
adc[0].begin();
adc[1].begin();
```

}

```
void IRQcounter(){if (direcao == 1){IRQcount++;}else{IRQcount--;}}
```

```
void loop(){
```

```
    if (digitalRead(39) == HIGH){AFCI = AFCI + 1; if(AFCI >= 100){AFCI = 10; FCI =
LOW;}} else{AFCI = 0; FCI = HIGH;}
    if (digitalRead(37) == HIGH){AFCS = AFCS + 1; if(AFCS >= 100){AFCS = 10; FCS
= LOW;}} else{AFCS = 0; FCS = HIGH;}
    if (digitalRead(49) == HIGH){ABEM = ABEM + 1; if(ABEM >= 100){ABEM = 10;
BEM = LOW;}} else{ABEM = 0; BEM = HIGH;}
    if (digitalRead(47) == LOW){ABSO = ABSO + 1; if(ABSO >= 100){ABSO = 10; BSO
= HIGH;}} else{ABSO = 0; BSO = LOW;}
    if (digitalRead(45) == LOW){ABDE = ABDE + 1; if(ABDE >= 100){ABDE = 10; BDE
= HIGH;}} else{ABDE = 0; BDE = LOW;}
    if (digitalRead(43) == LOW){ABHO = ABHO + 1; if(ABHO >= 100){ABHO = 10; BHO
= HIGH;}} else{ABHO = 0; BHO = LOW;}
    if (digitalRead(41) == LOW){ABZE = ABZE + 1; if(ABZE >= 100){ABZE = 10; BZE =
HIGH;}} else{ABZE = 0; BZE = LOW;}
    if (digitalRead(48) == LOW){ACC4 = ACC4 + 1; if(ACC4 >= 100){ACC4 = 10; CC4 =
HIGH;}} else{ACC4 = 0; CC4 = LOW;}
    if (digitalRead(46) == LOW){ACC3 = ACC3 + 1; if(ACC3 >= 100){ACC3 = 10; CC3 =
HIGH;}} else{ACC3 = 0; CC3 = LOW;}
    if (digitalRead(44) == LOW){ACC2 = ACC2 + 1; if(ACC2 >= 100){ACC2 = 10; CC2 =
HIGH;}} else{ACC2 = 0; CC2 = LOW;}
    if (digitalRead(42) == LOW){ACC1 = ACC1 + 1; if(ACC1 >= 100){ACC1 = 10; CC1 =
HIGH;}} else{ACC1 = 0; CC1 = LOW;}
```

```
// FCI != digitalRead(39);
// FCS != digitalRead(37);
// BEM != digitalRead(49);
// BSO != digitalRead(47);
// BDE != digitalRead(45);
// BHO != digitalRead(43);
// BZE != digitalRead(41);
// CC4 != digitalRead(48);
// CC3 != digitalRead(46);
// CC2 != digitalRead(44);
// CC1 != digitalRead(42);
```

```
    if(FCS == LOW){if(MAFCS == 0){noNewTone(PUL); MAFCS = 1;MAE = 0;}}
else{MAFCS = 0;}
    if(FCI == LOW){if(MAFCI == 0){noNewTone(PUL); MAFCI = 1;MAE = 0;}}
else{MAFCI = 0;}
```

```
attachInterrupt(pin_irq, IRQcounter, RISING);
detachInterrupt(pin);
```

```

forca = loadCell.getLatestRawValue();

    if(MAE == 1)
        {MAES = (257000*MC23M1)/100; MAEI = (257000*MC23M1)/100*(-1);}
    else{MAES = (257000*MC24M1)/100; MAEI = (257000*MC24M1)/100*(-1);}

    if(forca <= MAEI){LCCI = 1;}else{LCCI = 0;}

    if(forca >= MAES){LCCS = 1;}else{LCCS = 0;}

    if(LCCI == 1){if(MALCCI == 0){noNewTone(PUL); MALCCI = 1;MAE = 0;}}
    else{MALCCI = 0;}
    if(LCCS == 1){if(MALCCS == 0){noNewTone(PUL); MALCCS = 1;MAE = 0;}}
    else{MALCCS = 0;}

    if(LCCI == 1 || LCCS ==1){LCC = 1;}else{LCC = 0;}

CELULA = (CC1*1)+(CC2*2)+(CC3*4)+(CC4*8);

if(CELULA == 0){ECELULA = 1; noNewTone(PUL);}else{ECELULA = 0;}

ERRO = (BEM*1)+(FCI*2)+(FCS*4)+(LCC*8)+(ECELULA*16);

if(BEM == LOW){noNewTone(PUL);}

if(ERROCONEXAO > 10000){if(AUXCONEXAO == 0){noNewTone(PUL);MAE =
0;AUXCONEXAO = 1;}}

it++;
if (Serial.available()) //verifica se tem dados disponível para leitura
{
    ERROCONEXAO = 0;
    AUXCONEXAO = 0;
    //FAZ A LEITURA DO BUFFER USB
    byteRead = Serial.read();

    //FUNÇÃO DE ENVIO DO VALOR DA FORÇA
    if(byteRead == '1'){Serial.println(forca);}

    if(byteRead == '5'){Serial.println(loadCell.getWeight());}
    if(byteRead == '6'){loadCell.setZero();}

    //FUNÇÃO DE ENVIO DO VALOR DE POSIÇÃO
    if(byteRead == '2'){Serial.println(IRQcount);}

    //FUNÇÃO DE ENVIO ZERAR POSIÇÃO
    if(byteRead == '0'){IRQcount=0;}

```

```

//FUNÇÃO DE PARADA DE MOVIMENTO
if(byteRead == '3'){noNewTone(PUL); MAE = 0;}

if(BEM == HIGH)
{
//INICIAR MOVIMENTO DE AJUSTE NO SENTIDO PARA CIMA
if(byteRead == '4'){if(FCS == HIGH && LCCS == 0){direcao = 1; digitalWrite(DIR,
true);NewTone(PUL,VA1);MAE = 0;}else{noNewTone(PUL);}}

//INICIAR MOVIMENTO DE AJUSTE NO SENTIDO PARA BAIXO
if(byteRead == '5'){if(FCI == HIGH && LCCI == 0){direcao = 0; digitalWrite(DIR,
false);NewTone(PUL,VA1);MAE = 0;}else{noNewTone(PUL);}}

//INICIAR MOVIMENTO DE ENSAIO NO SENTIDO PARA CIMA
if(byteRead == '6'){if(FCS == HIGH && LCCS == 0){direcao = 1; digitalWrite(DIR,
true);NewTone(PUL,VE1);MAE = 1;}else{noNewTone(PUL);}}

//INICIAR MOVIMENTO DE ENSAIO NO SENTIDO PARA BAIXO
if(byteRead == '7'){if(FCI == HIGH && LCCI == 0){direcao = 0; digitalWrite(DIR,
false);NewTone(PUL,VE1);MAE = 1;}else{noNewTone(PUL);}}

//if(byteRead == '@'){VE1=VE1+1; if(VE1 >= 25000){VE1 = 25000;}
NewTone(PUL,VE1);}

//if(byteRead == '<'){VE1=VE1-1; if(VE1 <= 10){VE1 = 1;} NewTone(PUL,VE1);}

if(byteRead == ',')
{
if(IRQcount < MARAME){
AUXIRQcount = (IRQcount/(MC16M1/1000)) * (-1);
if(FCS == HIGH && LCCS == 0){direcao = 1; digitalWrite(DIR,
true);NewTone(PUL,MC16M1,AUXIRQcount);MAE = 0;}else{noNewTone(PUL);}
}
else if(IRQcount > MARAMA){
AUXIRQcount = (IRQcount/(MC16M1/1000));
if(FCI == HIGH && LCCI == 0){direcao = 0; digitalWrite(DIR,
false);NewTone(PUL,MC16M1,AUXIRQcount);MAE = 0;}else{noNewTone(PUL);}
}
}

if(byteRead == '.'){noNewTone(PUL);}

}
else {noNewTone(PUL);}

```

```

//FUNÇÃO DE LEITURA DA VELOCIDADE DE AJUSTE
if(byteRead == '8'){VA0 = Serial.readString();VA1=atoi(VA0.c_str());}

//FUNÇÃO DE LEITURA DA VELOCIDADE DE ENSAIO
if(byteRead == '9'){VE0 = Serial.readString();VE1=atoi(VE0.c_str());}

//CANAIS DE EXTENSÔMETRIA DE 1 A 4 (0-10V)
if(byteRead == '#'){Serial.println(adc[0].readVoltage(0)*100000);}
if(byteRead == '$'){Serial.println(adc[0].readVoltage(1)*100000);}
if(byteRead == '%'){Serial.println(adc[0].readVoltage(2)*100000);}
if(byteRead == '&'){Serial.println(adc[0].readVoltage(3)*100000);}

//CANAIS DE EXTENSÔMETRIA DE 1 A 4 (4-20 mA)
if(byteRead == '('){Serial.println(adc[1].read4to20mA(0)*100000,0);}
if(byteRead == ')'){Serial.println(adc[1].read4to20mA(1)*100000,0);}
if(byteRead == '*'){Serial.println(adc[1].read4to20mA(2)*100000,0);}
if(byteRead == '+'){Serial.println(adc[1].read4to20mA(3)*100000,0);}

//ARMAZENAMENTO DAS MEMÓRIAS NÃO VOLÁTEIS
//////////AQUI//AQUI//////////AQUI//////////AQUI//////////AQUI//////////
//////////AQUI//////////AQUI//////////
if(byteRead == 'A'){MC1M0 = Serial.readString(); MC1M1 = atoi(MC1M0.c_str());
datos = MC1M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
EEPROM.write(0, dato1[0]); EEPROM.write(1, dato2[0]);}
if(byteRead == 'B'){MC2M0 = Serial.readString(); MC2M1 = atoi(MC2M0.c_str());
datos = MC2M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
EEPROM.write(2, dato1[0]); EEPROM.write(3, dato2[0]);}
if(byteRead == 'C'){MC3M0 = Serial.readString(); MC3M1 = atoi(MC3M0.c_str());
datos = MC3M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
EEPROM.write(4, dato1[0]); EEPROM.write(5, dato2[0]);}
if(byteRead == 'D'){MC4M0 = Serial.readString(); MC4M1 = atoi(MC4M0.c_str());
datos = MC4M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
EEPROM.write(6, dato1[0]); EEPROM.write(7, dato2[0]);}
if(byteRead == 'E'){MC5M0 = Serial.readString(); MC5M1 = atoi(MC5M0.c_str());
datos = MC5M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
EEPROM.write(8, dato1[0]); EEPROM.write(9, dato2[0]);}
if(byteRead == 'F'){MC6M0 = Serial.readString(); MC6M1 = atoi(MC6M0.c_str());
datos = MC6M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8); EEPROM.write(10,
dato1[0]); EEPROM.write(11, dato2[0]);}
if(byteRead == 'G'){MC7M0 = Serial.readString(); MC7M1 = atoi(MC7M0.c_str());
datos = MC7M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8); EEPROM.write(12,
dato1[0]); EEPROM.write(13, dato2[0]);}
if(byteRead == 'H'){MC8M0 = Serial.readString(); MC8M1 = atoi(MC8M0.c_str());
datos = MC8M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8); EEPROM.write(14,
dato1[0]); EEPROM.write(15, dato2[0]);}
if(byteRead == 'I'){MC9M0 = Serial.readString(); MC9M1 = atoi(MC9M0.c_str());
datos = MC9M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8); EEPROM.write(16,
dato1[0]); EEPROM.write(17, dato2[0]);}

```

```

    if(byteRead == 'J'){MC10M0 = Serial.readString(); MC10M1 =
    atoi(MC10M0.c_str()); datos = MC10M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(18, dato1[0]); EEPROM.write(19, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'K'){MC11M0 = Serial.readString(); MC11M1 =
    atoi(MC11M0.c_str()); datos = MC11M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(20, dato1[0]); EEPROM.write(21, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'L'){MC12M0 = Serial.readString(); MC12M1 =
    atoi(MC12M0.c_str()); datos = MC12M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(22, dato1[0]); EEPROM.write(23, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'M'){MC13M0 = Serial.readString(); MC13M1 =
    atoi(MC13M0.c_str()); datos = MC13M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(24, dato1[0]); EEPROM.write(25, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'N'){MC14M0 = Serial.readString(); MC14M1 =
    atoi(MC14M0.c_str()); datos = MC14M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(26, dato1[0]); EEPROM.write(27, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'O'){MC15M0 = Serial.readString(); MC15M1 =
    atoi(MC15M0.c_str()); datos = MC15M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(28, dato1[0]); EEPROM.write(29, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'P'){MC16M0 = Serial.readString(); MC16M1 =
    atoi(MC16M0.c_str()); datos = MC16M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(30, dato1[0]); EEPROM.write(31, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'Q'){MC17M0 = Serial.readString(); MC17M1 =
    atoi(MC17M0.c_str()); datos = MC17M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(32, dato1[0]); EEPROM.write(33, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'R'){MC18M0 = Serial.readString(); MC18M1 =
    atoi(MC18M0.c_str()); datos = MC18M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(34, dato1[0]); EEPROM.write(35, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'S'){MC19M0 = Serial.readString(); MC19M1 =
    atoi(MC19M0.c_str()); datos = MC19M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(36, dato1[0]); EEPROM.write(37, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'T'){MC20M0 = Serial.readString(); MC20M1 =
    atoi(MC20M0.c_str()); datos = MC20M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(38, dato1[0]); EEPROM.write(39, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'U'){MC21M0 = Serial.readString(); MC21M1 =
    atoi(MC21M0.c_str()); datos = MC21M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(40, dato1[0]); EEPROM.write(41, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'V'){MC22M0 = Serial.readString(); MC22M1 =
    atoi(MC22M0.c_str()); datos = MC22M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(42, dato1[0]); EEPROM.write(43, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'W'){MC23M0 = Serial.readString(); MC23M1 =
    atoi(MC23M0.c_str()); datos = MC23M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(44, dato1[0]); EEPROM.write(45, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'X'){MC24M0 = Serial.readString(); MC24M1 =
    atoi(MC24M0.c_str()); datos = MC24M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(46, dato1[0]); EEPROM.write(47, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'Y'){MC25M0 = Serial.readString(); MC25M1 =
    atoi(MC25M0.c_str()); datos = MC25M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(48, dato1[0]); EEPROM.write(49, dato2[0]);}
    if(byteRead == 'Z'){MC26M0 = Serial.readString(); MC26M1 =
    atoi(MC26M0.c_str()); datos = MC26M1; dato1[0] = datos; dato2[0] = (datos>>8);
    EEPROM.write(50, dato1[0]); EEPROM.write(51, dato2[0]);}

```

```

if(byteRead == '['){MC27M0 = Serial.readString(); MC27M1 =
atoi(MC27M0.c_str()); dados = MC27M1; dato1[0] = dados; dato2[0] = (dados>>8);
EEPROM.write(52, dato1[0]); EEPROM.write(53, dato2[0]);}

```

```

if(byteRead == 'J'){MC28M0 = Serial.readString(); MC28M1 =
atoi(MC28M0.c_str()); dados = MC28M1; dato1[0] = dados; dato2[0] = (dados>>8);
EEPROM.write(54, dato1[0]); EEPROM.write(55, dato2[0]);}

```

```

if(byteRead == '^'){MC29M0 = Serial.readString(); MC29M1 =
atoi(MC29M0.c_str()); dados = MC29M1; dato1[0] = dados; dato2[0] = (dados>>8);
EEPROM.write(56, dato1[0]); EEPROM.write(57, dato2[0]);}

```

```

if(byteRead == '_'){MC30M0 = Serial.readString(); MC30M1 =
atoi(MC30M0.c_str()); dados = MC30M1; dato1[0] = dados; dato2[0] = (dados>>8);
EEPROM.write(58, dato1[0]); EEPROM.write(59, dato2[0]);}

```

//LEITURA DAS MEMÓRIAS NÃO VOLÁTEIS

```

//////////AQUI//////////AQUI//////////AQUI//////////AQUI//////////
//////////AQUI////

```

```

if(byteRead == 'a'){value0 = EEPROM.read(0); value1 =
EEPROM.read(1); MC1M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC1M1);}
if(byteRead == 'b'){value0 = EEPROM.read(2); value1 =
EEPROM.read(3); MC2M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC2M1);}
if(byteRead == 'c'){value0 = EEPROM.read(4); value1 =
EEPROM.read(5); MC3M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC3M1);}
if(byteRead == 'd'){value0 = EEPROM.read(6); value1 =
EEPROM.read(7); MC4M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC4M1);}
if(byteRead == 'e'){value0 = EEPROM.read(8); value1 =
EEPROM.read(9); MC5M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC5M1);}
if(byteRead == 'f'){value0 = EEPROM.read(10); value1 = EEPROM.read(11);
MC6M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC6M1);}
if(byteRead == 'g'){value0 = EEPROM.read(12); value1 = EEPROM.read(13);
MC7M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC7M1);}
if(byteRead == 'h'){value0 = EEPROM.read(14); value1 = EEPROM.read(15);
MC8M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC8M1);}
if(byteRead == 'i'){value0 = EEPROM.read(16); value1 = EEPROM.read(17);
MC9M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC9M1);}
if(byteRead == 'j'){value0 = EEPROM.read(18); value1 = EEPROM.read(19);
MC10M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC10M1);}
if(byteRead == 'k'){value0 = EEPROM.read(20); value1 = EEPROM.read(21);
MC11M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC11M1);}
if(byteRead == 'l'){value0 = EEPROM.read(22); value1 = EEPROM.read(23);
MC12M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC12M1);}
if(byteRead == 'm'){value0 = EEPROM.read(24); value1 = EEPROM.read(25);
MC13M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC13M1);}
if(byteRead == 'n'){value0 = EEPROM.read(26); value1 = EEPROM.read(27);
MC14M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC14M1);}
if(byteRead == 'o'){value0 = EEPROM.read(28); value1 = EEPROM.read(29);
MC15M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC15M1);}
if(byteRead == 'p'){value0 = EEPROM.read(30); value1 = EEPROM.read(31);
MC16M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC16M1);}

```

```

    if(byteRead == 'q'){value0 = EEPROM.read(32); value1 = EEPROM.read(33);
MC17M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC17M1);}
    if(byteRead == 'r'){value0 = EEPROM.read(34); value1 = EEPROM.read(35);
MC18M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC18M1);}
    if(byteRead == 's'){value0 = EEPROM.read(36); value1 = EEPROM.read(37);
MC19M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC19M1);}
    if(byteRead == 't'){value0 = EEPROM.read(38); value1 = EEPROM.read(39);
MC20M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC20M1);}
    if(byteRead == 'u'){value0 = EEPROM.read(40); value1 = EEPROM.read(41);
MC21M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC21M1);}
    if(byteRead == 'v'){value0 = EEPROM.read(42); value1 = EEPROM.read(43);
MC22M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC22M1);}
    if(byteRead == 'w'){value0 = EEPROM.read(44); value1 = EEPROM.read(45);
MC23M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC23M1);}
    if(byteRead == 'x'){value0 = EEPROM.read(46); value1 = EEPROM.read(47);
MC24M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC24M1);}
    if(byteRead == 'y'){value0 = EEPROM.read(48); value1 = EEPROM.read(49);
MC25M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC25M1);}
    if(byteRead == 'z'){value0 = EEPROM.read(50); value1 = EEPROM.read(51);
MC26M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC26M1);}

```

```

    if(byteRead == '{'){value0 = EEPROM.read(52); value1 = EEPROM.read(53);
MC27M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC27M1);}
    if(byteRead == '|'){value0 = EEPROM.read(54); value1 = EEPROM.read(55);
MC28M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC28M1);}
    if(byteRead == '}'){value0 = EEPROM.read(56); value1 = EEPROM.read(57);
MC29M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC29M1);}
    if(byteRead == '~'){value0 = EEPROM.read(58); value1 = EEPROM.read(59);
MC30M1 = value0 +(value1 * 256); Serial.println(MC30M1);}

```

```

    if(byteRead == '='){Serial.println(CELULA);}
    if(byteRead == '>'){Serial.println(ERRO);}
    if(byteRead == '?'){Serial.println("1");}

```

```

}
else
{
    ERROCONEXAO ++;
}

```

```

if(BZE == HIGH && MAE == LOW)
{
    noNewTone(PUL);
}

```

```

IRQcount=0;
}

if(BEM == HIGH)
{
if(BHO == HIGH && MAE == LOW)
{
if(IRQcount < MARAMA){
AUXIRQcount = (IRQcount/(MC16M1/1000)) * (-1);
if(FCS == HIGH && LCCS == 0){direcao = 1; digitalWrite(DIR,
true);NewTone(PUL,MC16M1,AUXIRQcount);MAE = 0;}else{noNewTone(PUL);}
}
else if(IRQcount > MARAMA){
AUXIRQcount = (IRQcount/(MC16M1/1000));
if(FCI == HIGH && LCCI == 0){direcao = 0; digitalWrite(DIR,
false);NewTone(PUL,MC16M1,AUXIRQcount);MAE = 0;}else{noNewTone(PUL);}
}
}

if(BSO == HIGH && MAE ==0)
{
if(MABSOON == 0)
{
MABSOON = 1; MABSOOFF = 0; if(FCS == HIGH && LCCS == 0){direcao = 1;
digitalWrite(DIR, true);NewTone(PUL,VA1);MAE = 0;}else{noNewTone(PUL);}
}
}
else
{
if(MABSOOFF == 0){MABSOOFF = 1; MABSOON = 0;noNewTone(PUL);}
}

if(BDE == HIGH && MAE ==0)
{
if(MABDEON == 0)
{
MABDEON = 1; MABDEOFF = 0; if(FCI == HIGH && LCCI == 0){direcao = 0;
digitalWrite(DIR, false);NewTone(PUL,VA1);MAE = 0;}else{noNewTone(PUL);}
}
}
else
{
if(MABDEOFF == 0){MABDEOFF = 1; MABDEON = 0;noNewTone(PUL);}
}
}
else {noNewTone(PUL);}
}
}

```



```

FpsLabel                matlab.ui.control.Label
ResetarButton           matlab.ui.control.Button
SalvarVideoButton      matlab.ui.control.StateButton
SalvarDadosButton      matlab.ui.control.Button
LimiteelsticoLabel     matlab.ui.control.Label
UIAxes                 matlab.ui.control.UIAxes
RightPanel             matlab.ui.container.Panel
GridLayout2            matlab.ui.container.GridLayout
TesteCentrosButton     matlab.ui.control.Button
TestedeDetecoButton    matlab.ui.control.Button
ImagemokButton         matlab.ui.control.StateButton
UIAxes2                matlab.ui.control.UIAxes
end

```

```
% Properties that correspond to apps with auto-reflow
```

```
properties (Access = private)
```

```
onePanelWidth = 576;
```

```
twoPanelWidth = 768;
```

```
end
```

```
properties (Access = private)
```

```
videoPath % Description
```

```
nFrames
```

```
vid
```

```
pos_rect
```

```
A
```

```
B
```

```
C
```

```
DialogApp
```

```
initialDistanceBetweenRois
```

```
d
```

```
dInCm
```

```
stopLiveCam
```

```
camera
```

```
ard
```

```
execDate
```

```
videoFrames
```

```
CargaMaxima
```

```
DeslocamentoNaCargaMaxima
```

```
ModuloYuong
```

```
CargaLimiteElastico
```

```
DeslocamentoLimiteElastico
```

```
PosicaoElastico
```

```
PosicaoLimiteElastico
```

```
Parametros
```

```
%jrb
```

```
Faixa
```

```
Escala = 10000;
```

```
Kg2N = 9.80665;
```

```
frames2Shutdown = 5;
```

```
frames2ShutdownBy2 = 10;
```

```
UtilMedido = 1;
```

```
SeccaoCorpoProva = 1;
```

```
FiltroRudoX = 1;
```

```
FiltroRudoY = 1;
```

```
LimiarBinrio = 0.1;
```

```
AreaMnimaLaser = 100;
```

```
AreaMximaLaser = 100000;
```

```
SelecaoCamera = 3;
```

```

Material = 'EnsaioSMD' % Definição do material SMD = Sem Material
Definido
comprimentoPlastico = 20000;
comprimentoElastico = 05000;
ArquivoLido = 0;
end

properties (Access = public)
    MatrizAprendizado % Description
end

methods (Access = private)

    function Imagem(app)
        fig2crop = snapshot(app.camera);
        l = strfind(app.camera.Resolution, 'x');
        ResolutionCamXby2 = round(str2double(app.camera.Resolution(1:
l-1))/2);
        ResolutionCamYby20 = round(str2double(app.camera.Resolution(l+1
: ...
        length(app.camera.Resolution))*10);
        ResolutionCamY = round(str2double(app.camera.Resolution(l+1 :
...
        length(app.camera.Resolution))));
        app.pos_rect = [ResolutionCamXby2-ResolutionCamYby20 0 2 *...
        ResolutionCamYby20 ResolutionCamY];
        % app.pos_rect = [300 0 40 360];
        while 1
            tic
            NewImagem = imcrop(fig2crop, app.pos_rect);
            imshow(NewImagem, 'Parent', app.UIAxes2);
            fig2crop = snapshot(app.camera);

            newt = toc;
            fps = (1/newt);
            app.FpsLabel.Text = sprintf('%2.2f', fps);
            drawnow;
            if (app.ImagemokButton.Value == 1)
                break;
            end
        end
    end
end

%-----
%-----
%Função Localização dos pontos de interesse
function [CargaMaxima, DeslocamentoNaCargaMaxima, ModuloYuong,
CargaLimiteElastico, ...
        DeslocamentoLimiteElastico, ElasX ] = ...
        PontosInteresse(~, Carga, Deslocamento)

[Carga, Deslocamento] = DelDuplicados(Carga, Deslocamento);

ElasX = 1;
CargaMaxima =max(max(Carga));
[Posicao, ~] = find(Carga == CargaMaxima, 1);
DeslocamentoNaCargaMaxima = Deslocamento(Posicao);
Deformacao = 0:0.01:Deslocamento(end)-0.01;

```

```

Forca_INT = interp1(Deslocamento,Carga,Deformacao);
Comprimento = length(Forca_INT);

DeslocamentoLimiteElastico = Deformacao(fix(Comprimento*.8));
CargaLimiteElastico = Forca_INT(fix(Comprimento*.8));
ModuloYuong = tan(0.5*pi/180);
[F,~] = max(Forca_INT);
[~,I] = find(Forca_INT>(F*.3),1,"first");
if I == 1
    I=2;
end

for n = I:fix(length(Deformacao)*.89)
    AnguloBy2 = atan((Forca_INT(n-1) - Forca_INT(I))/ ...
        (Deformacao(n-1) - Deformacao(I)))*(180/pi)/2;
    NextAngulo = atan((Forca_INT(n+1) - Forca_INT(n))/ ...
        (Deformacao(n+1) - Deformacao(n)))*180/pi;

    if NextAngulo < AnguloBy2
        [ElasX,~] = find(Carga >= Forca_INT(n),1,"first");
        DeslocamentoLimiteElastico = Deslocamento(ElasX);
        CargaLimiteElastico = Carga(ElasX);
        ModuloYuong = (Forca_INT(n)-Forca_INT(I))/ ...
            (Deformacao(n)-Deformacao(I));
        break
    end
end
function [Carga, Deslocamento] = DelDuplicados(MatrizCarga,
MatrizDeslocamento)
    indices_repetidos = [];
    primeiro_repetido = [];
    for i = 1:length(MatrizCarga)
        if ~isempty(find(MatrizCarga(i+1:end) ==
MatrizCarga(i), 1))
            indices_repetidos = [indices_repetidos, i];
        end
    end

    if ~isempty(indices_repetidos)
        primeiro_repetido = indices_repetidos(1);
    end

    while ~isempty(primeiro_repetido)

        indice_excluir = find(MatrizCarga ==
MatrizCarga(primeiro_repetido), 1);

        MatrizCarga(indice_excluir) = [];
        MatrizDeslocamento(indice_excluir) = [];

        indices_repetidos = [];
        primeiro_repetido = [];

        for i = 1:length(MatrizCarga)
            if ~isempty(find(MatrizCarga(i+1:end) ==
MatrizCarga(i), 1))
                indices_repetidos = [indices_repetidos, i];
            end
        end

        if ~isempty(indices_repetidos)

```

```

        primeiro_repetido = indices_repetidos(1);
    end
end
indices_repetidos = [];
primeiro_repetido = [];
for i = 1:length(MatrizDeslocamento)
    if ~isempty(find(MatrizDeslocamento(i+1:end) ==
MatrizDeslocamento(i), 1))
        indices_repetidos = [indices_repetidos, i];
    end
end

if ~isempty(indices_repetidos)
    primeiro_repetido = indices_repetidos(1);
end

while ~isempty(primeiro_repetido)

    indice_excluir = find(MatrizDeslocamento ==
MatrizDeslocamento(primeiro_repetido), 1);

    MatrizCarga(indice_excluir) = [];
    MatrizDeslocamento(indice_excluir) = [];

    indices_repetidos = [];
    primeiro_repetido = [];

    for i = 1:length(MatrizDeslocamento)
        if ~isempty(find(MatrizDeslocamento(i+1:end) ==
MatrizDeslocamento(i), 1))
            indices_repetidos = [indices_repetidos, i];
        end
    end

    if ~isempty(indices_repetidos)
        primeiro_repetido = indices_repetidos(1);
    end
end
Carga = MatrizCarga;
Deslocamento = MatrizDeslocamento;

end

end

end
%jrb -----

methods (Access = public)

%-----
%Função geração de curva
function [NovoLimElasY, NovoLimElasX, PosX, Defor, Forca, XElas] =
CurvaAprendizado(~, ...
Aprendizado,L)

NovoLimRe = Aprendizado(31);

```

```

NovoYoung = Aprendizado(34);
NovoLimElasY = Aprendizado(32);
MaxDelta_mm = Aprendizado(33);
NovoLimElasX = Aprendizado(36);
NovoPasso = MaxDelta_mm / Aprendizado(37);
NovoFim = fix(Aprendizado(37));
% Forca = zeros(NovoFim);
% Defor = zeros(NovoFim);
% Geração da curva por Vandermonde
x = 1:L;
Vander = Aprendizado(1:21);
SA_curva = polyval(Vander,x);

% Iniciar geração curva resultante
Forca(1) = 0;
Defor(1) = 0;

% Geração area elastica curva resultante
for i = 2 : NovoFim
    Defor(i) = Defor(i-1) + NovoPasso;
    Forca(i) = Defor(i) * NovoYoung;
    if Forca(i) >= NovoLimElasY
        NovoLimX = i;
        break
    end
end
XElas = NovoLimX;
% Cálculo ajuste das curvas Vandermonde
DifY = Forca(end) - SA_curva(1);
SA_curva = SA_curva + DifY;
[Valor,Posicao] = max(SA_curva);
DifRes = NovoLimRe-Valor;

S_curva(1) = SA_curva(1);
for i = 2 :Posicao
    S_curva(i) = SA_curva(i)+(DifRes/Posicao)*i;
end
Pos = length(SA_curva)-Posicao;
for j = Posicao+1:length(SA_curva)
    S_curva(j) = SA_curva(j)+(DifRes/Pos)*(length(SA_curva)-j);
end

Forca = [Forca S_curva];
NovoPasso = (MaxDelta_mm - Defor(end))/ length(Forca);
for i = NovoLimX+1 :length(Forca)
    Defor(i) = Defor(i-1) + NovoPasso;
end
[Valor,PosX] = max(Forca);

end

%Final da função Curva Ajustada
%-----
%-----
%-----
%-----

%Função gerar Curva resultado
function MatrizRes = Media(~, MatrizA, MatrizB,L, LE)
    peso = MatrizB(39);
    pesoAdd1 = peso + 1;

```

```

NovoLimRe = (MatrizA(31) + MatrizB(31)*peso)/pesoAdd1;
NovoYoung = (MatrizA(34) + MatrizB(34)*peso)/pesoAdd1;
NovoLimElasY = (MatrizA(32) + MatrizB(32)*peso)/pesoAdd1;
NovoMaxAlong = (MatrizA(33) + MatrizB(33)*peso)/pesoAdd1;
NovoPasso = ((MatrizA(33) / MatrizA(37)*peso)+(MatrizB(33) /
MatrizB(37)))/pesoAdd1;
NovoFim = fix((MatrizA(37) + MatrizB(37)*peso)/pesoAdd1);

% Geração das curvas A e B por Vandermonde
x=1:L;
% Matriz A

Vander = MatrizA(1:21);
SA_curva = polyval(Vander,x);

% Matriz B
Vander = MatrizB(1:21);
SB_curva = polyval(Vander,x);

% Media das curvas Vander
CurvaMed = median([SA_curva ; SB_curva]);

% Iniciar geração curva resultante
Forca(1) = 0;
Defor(1) = 0;

% Geração area elastica curva resultante
for i = 2 : NovoFim
    Defor(i) = Defor(i-1) + NovoPasso;
    Forca(i) = Defor(i) * NovoYoung;
    if Forca(i) >= NovoLimElasY
        NovoLimX = i;
        break
    end
end
DeformacaoMin = Defor(end)/LE;
Deformacao = 0:DeformacaoMin:Defor(end)-DeformacaoMin;
Forca_INT = interp1(Defor,Forca,Deformacao);

% Calculo ajuste das curvas Vandermonde
DifY = Forca_INT(end) - CurvaMed(1);
CurvaMed = CurvaMed + DifY;
% [Valor,Posicao] = max(CurvaMed);
% DifRes = NovoLimRe/Valor;

Forca = [Forca CurvaMed];
DefPlastica = Deformacao(end)+(NovoMaxAlong -
Deformacao(end))/L: ...
(NovoMaxAlong -Deformacao(end))/L :NovoMaxAlong -
((NovoMaxAlong -Deformacao(end))/L);
Defor = [Deformacao DefPlastica];

x=1:L;
MatrizRes = polyfit(x,CurvaMed,20);

MatrizRes(30) = (MatrizA(30) + MatrizB(30)*peso)/pesoAdd1;
MatrizRes(31) = (MatrizA(31) + MatrizB(31)*peso)/pesoAdd1;

```

```

    MatrizRes(32) = (MatrizA(32) + MatrizB(32)*peso)/pesoAdd1;
    MatrizRes(33) = (MatrizA(33) + MatrizB(33)*peso)/pesoAdd1;
    MatrizRes(34) = (MatrizA(34) + MatrizB(34)*peso)/pesoAdd1;
    MatrizRes(35) = round((MatrizA(35) +
MatrizB(35)*peso)/pesoAdd1);
    MatrizRes(36) = (MatrizA(36) + MatrizB(36)*peso)/pesoAdd1;
    MatrizRes(37) = round((MatrizA(37) +
MatrizB(37)*peso)/pesoAdd1);
    MatrizRes(38) = round((MatrizA(38) +
MatrizB(38)*peso)/pesoAdd1);
    MatrizRes(39) = round(MatrizA(39) + MatrizB(39));

```

```

% Determina comprimento da menor matriz
if length(Forca) < length(Deform)
    cmp = length(Forca);
    Deform = Deform(1:cmp);
else
    cmp = length(Deform);
    Forca = Forca(1:cmp);
end

```

```

end % Final Função Media

```

```

%-----

```

```

%Função Vandermonde

```

```

function Matriz = ParametrosVander(~ , DeformacaoX,ForcaY,
PosicaoXElas, ComprimentoPlast)
    %calculo da função de controle
    fcx = DeformacaoX(PosicaoXElas:end);
    fcy = ForcaY(PosicaoXElas:end);
    DeformacaoMin = (DeformacaoX(end)-fcx(1))/
ComprimentoPlast;
    Deformacao = fcx(1):DeformacaoMin:DeformacaoX(end)-
DeformacaoMin;
    Forca_INT = interp1(fcx,fcy,Deformacao);
    x = 1:length(Deformacao);
    % Criar matriz Vandermonde
    Matriz = polyfit(x,Forca_INT,20);
end %Função Vandermonde

```

```

%-----

```

```

%-----

```

```

%Função salvar curva de aprendizado

```

```

function SalvaAprendizado(app, Material, Alongamento, Forca, CargaMaxima,
DeslocamentoNaCargaMaxima,...
    ModuloYuong, CargaLimiteElastico, PosicaoLimiteElastico,
ComprimentoPlast)
    if ~isempty(Material)
        Deformacao = 0:0.01:Alongamento(end)-0.01;
        Forca_INT = interp1(Alongamento,Forca,Deformacao);
        Comprimento = length(Forca_INT);

        MatrizA =
ParametrosVander(app,Deformacao,Forca_INT,PosicaoLimiteElastico,Comprimento
Plast);
        % Nome do arquivo

```

```

    arq =
strcat(mfilename('fullpath'),'\\',lower(app.NomeEditField.Value),'.txt');
    % % % % Valor da carga de escoamento Mpa
    % % % MatrizA(30) = round(CargaEsc,4,'significant');
    %Valor do limite de resistencia
    MatrizA(31) = round(CargaMaxima,4,'significant');
    %Valor da carga limite elastico
    MatrizA(32) = round(CargaLimiteElastico,4,'significant');
    % Alongamento maximo encontrado
    MatrizA(33) = round(max(Deformacao),4,'significant');
    % Modulo de Young
    MatrizA(34) = round(ModuloYuong,4,'significant');
    %Posição do limite Elastico em X
    MatrizA(35) = round(PosicaoLimiteElastico,4,'significant');
    %Valor do alongamento no limite Elastico
    MatrizA(36) =
round(Deformacao(PosicaoLimiteElastico),4,'significant');
    %Comprimento da matriz de teste em pontos
    MatrizA(37) = round(Comprimento,4,'significant');
    %Posição do limite Elastico em Y
    MatrizA(38) = round(PosicaoLimiteElastico,4,'significant');
    % Sobreposição de calculo
    MatrizA(39) = 1;
    %Calculo do novo passo em x
    PassoXA = MatrizA(33)/app.comprimentoPlastico;

    %Calculo area plastica
    for i = 1: (MatrizA(37) - MatrizA(35))
        EixoXA(i) = (i * PassoXA) + MatrizA(36);
    end

    % Curva de aprendizado
    Vander = MatrizA(1:21);
    A_curva = polyval(Vander,EixoXA);
    %Verifica se o arquivo de aprendizado ja existe
    if isfile(arq)
        MatrizB = readmatrix(arq);
        MatrizAuxiliar = Media(app, MatrizA, MatrizB,...
            app.comprimentoPlastico, app.comprimentoElastico);

    else

        MatrizAuxiliar = MatrizA;
    end
end
writematrix(MatrizAuxiliar,arq);
end

%-----
%Função Deleta duplicados

end
%final da Função salvar curva de aprendizado
%-----

```

% Callbacks that handle component events  
 methods (Access = private)

```

% Code that executes after component creation
function startupFcn(app)
    app.stopLiveCam = 0;

%jrb -----
    % cameras = webcamlist;
    % nome_desejado = 'Logitech Webcam C925e';%'Logitech Webcam
C925e';HD Pro Webcam C920

    Parametros = readmatrix('parametros.dat');
    PortaCom = Parametros(1);
    CameraW = Parametros(2);
    app.camera = webcam("HD Pro Webcam C920 #2");
    % if ismember(nome_desejado, cameras)
    %     indice = find(strcmp(cameras, nome_desejado));
    %     app.camera = webcam(indice);
    % else
    %     f = msgbox('Câmera não encontrada.', "Error", "error");
    %     return;
    % end

    app.ard = serialport("/dev/cu.usbmodem14101", 115200, 'TimeOut',
1);

    % Espera comunicação do Arduino
    while 1
        writeline(app.ard, "5");
        data = readline(app.ard);
        if ~isempty(data)
            writeline(app.ard, "1");
            writeline(app.ard, "5");
            data = readline(app.ard);
            if ~isempty(data)
                writeline(app.ard, "6");
                break;
            end
        end
    end

%jrb -----
    end

    % Value changed function: EnsaioSwitch
    function initProcessVideo(app, event)

%jrb -----
    SWValue = app.EnsaioSwitch.Value;
    if (SWValue == '0')
        app.ParadoLamp.Color = 'red';
        app.ParadoLabel.Text= 'Parado';
        return;
    else
        Maximo = 0;
%jrb -----
        k=0;
        delay2Shutdown = 0;
        app.A = [];
        app.B = [];
        app.C = [];
        app.videoFrames = cell([],1);

```

```

app.execDate = [];
app.EixoXButtonGroup.Enable = "off";
app.ParadoLamp.Color = 'green';
app.ParadoLabel.Text= 'Executando';
hblob = vision.BlobAnalysis('AreaOutputPort', false, ... % Set
blob analysis handling
                                'CentroidOutputPort', true, ...
                                'BoundingBoxOutputPort', true', ...
                                'MinimumBlobArea', app.AreaMnimaLaser, ...
                                'MaximumBlobArea', app.AreaMximaLaser, ...
                                'MaximumCount', 2);

app.UtilMedido = 1;
if app.DINSwitch.Value == 0
    app.SeccaoCorpoProva = pi *
(app.DimetrommEditField.Value/2)^2;
else
    app.SeccaoCorpoProva = app.LargurammEditField.Value *
app.EspessurammEditField.Value;
end
Kg2Mpa = app.Kg2N / app.SeccaoCorpoProva;
writeline(app.ard, "6");
app.CelCargaLabelValue.Text = strcat(sprintf('%0.1f',0.00),'
Mpa');
app.ForLabel.Text = 'Tensão: ';

I = snapshot(app.camera);

% Calcula a distância inicial entre as Regiões de Interesse
X = imcrop(I,app.pos_rect);
diffFrame = imsubtract(X(:,:,1), rgb2gray(X)); % Get red
component of the image
diffFrame = medfilt2(diffFrame, [app.FiltroRudoX
app.FiltroRudoY]); %
binFrame = imbinarize(diffFrame, app.LimiarBinrio); % Convert
the image into binary image with the red objects as white
[centroid] = step(hblob, binFrame); % Get the centroids and
bounding boxes of the blobs

%centroid = uint16(centroid); % Convert the centroids into
Integer for further steps
dist = abs(centroid(1,2) - centroid(2,2));
disp(double(dist))
app.initialDistanceBetweenRois = dist;
% % % app.dInitialInPixelValue.Text = num2str(dist);

if (app.DeformaoButton.Value)
    dInmm = app.ComprimentotilmmEditField.Value;
else
    dInmm = 0;
end

%jrb -----

if (app.CargaButton.Value)
    funcExec = ['writeline(app.ard, "5");'...'
'valueFromBuffer =
abs((str2double(readline(app.ard))/app.Escala)*Kg2Mpa);'...'
'app.CelCargaLabelValue.Text =
strcat(sprintf('%0.1f',valueFromBuffer),' Mpa');'...'
'if valueFromBuffer > Maximo;'...'

```

```

        'Maximo = valueFromBuffer; '...
        'elseif valueFromBuffer < (Maximo / 3); '...
        'app.EnsaioSwitch.Value = '0''; '...
        'return; '...
        'end; '...
        'app.C = [app.C, valueFromBuffer]; '...
        'apliedInputValue = app.C; '...
        'app.A = [app.A, app.dInCm]; '...
        'app.execDate = [app.execDate,
datetime("now", "Format", "HH:mm:ss.SSS")]; '];
        funcExecL = ['if ~isempty(app.A); '...
                    'if app.A(end) >= app.dInCm; '...
                    'app.dInCm = app.A(end) + 0.00001; '...
                    'end; '...
                    'end; '];
    else
        funcExec = ['app.B = [app.B, k]; '...
                   'apliedInputValue = app.B; '...
                   'app.A = [app.A, app.dInCm]; '...
                   'app.execDate = [app.execDate,
datetime("now", "Format", "HH:mm:ss.SSS")]; '];
        funcExecL = '';
    end

%jrb -----

    while 1
        tic
        I = snapshot(app.camera);
        X = imcrop(I, app.pos_rect);
        imshow(X, 'Parent', app.UIAxes2);

        diffFrame = imsubtract(X(:,:,1), rgb2gray(X)); % Get red
component of the image
        diffFrame = medfilt2(diffFrame, [app.FiltroRudoX
app.FiltroRudoY]); % Filter out the noise by using median filter
        binFrame = imbinarize(diffFrame, app.LimiarBinrio); %
Convert the image into binary image with the red objects as white
        [centroid, bbox] = step(hblob, binFrame); % Get the
centroids and bounding boxes of the blobs

        % Garante que temos 2 pontos de interesse sempre, caso
contrário para o loop
        blobsCount = uint8(length(bbox(:,1)));
        if(blobsCount <= 1)
            if(delay2Shutdown >= app.frames2Shutdown)
                break;
            end
            delay2Shutdown = delay2Shutdown + 1;
        else
            app.d = abs(centroid(1,2) - centroid(2,2));
            delay2Shutdown = 0;
        end
        app.dInCm =
abs((((double(app.ComprimentotilmmEditField.Value)*app.d)/...
double(app.initialDistanceBetweenRois))-dInmm) *
app.UtilMedido);
        app.Label.Text = strcat(sprintf('%0.3f', app.dInCm));

```

```

%jrb -----
        eval(funcExecL);
        eval(funcExec);
%jrb -----

        app.videoFrames{k+1} = X; % save frame to arr
        plot(app.UIAxes,app.A, appliedInputValue,"Color",[0 0
1], "LineWidth",2);

        SWValue = app.EnsaioSwitch.Value;
        if SWValue == '0'
            app.ParadoLamp.Color = 'red';
            app.ParadoLabel.Text= 'Parado';
            app.EixoXButtonGroup.Enable = "on";
            clear app.ard;
            drawnow;
            break;
        end
        newt = toc;
        fps = (1/newt);
        app.FpsLabel.Text = sprintf('%2.2f', fps);
        drawnow('limitrate');
        k = k+1;
    end

%jrb -----

        if (app.CargaButton.Value)
            if length(app.A) > 30
                app.UIAxes.NextPlot = 'add';
                [app.CargaMaxima, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
app.ModuloYuong, app.CargaLimiteElastico, ...
                app.DeslocamentoLimiteElastico,
app.PosicaoElastico] = PontosInteresse(app, app.C ,app.A );
                plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
app.CargaMaxima,'b*');
                text(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima * .8,
app.CargaMaxima * .99, ...
                    strcat('limite Resistência = ',
num2str(app.CargaMaxima), ' Mpa'),'FontSize',14);
                plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
app.CargaLimiteElastico,'r*');
                text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico * .8,
app.CargaLimiteElastico * .99, ...
                    strcat('limite Elástico = ',
num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa'),'FontSize',14);
                text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
app.CargaLimiteElastico * .8, ...
                    strcat('Módulo de Yuong =
',num2str(app.ModuloYuong)), 'FontSize',14 );
                app.MduloelasticidadeLabel_2.Text =
strcat(num2str(app.ModuloYuong), ' Mpa');
                app.LimiteelasticoLabel.Text =
strcat(num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa');
                app.LimiteResistenciaLabel.Text =
strcat(num2str(app.CargaMaxima), ' Mpa');
            end
        end

%jrb -----
        app.ParadoLamp.Color = 'red';

```

```

app.ParadoLabel.Text= 'Parado';
app.EixoXButtonGroup.Enable = "on";

end
end

% Button pushed function: TestedeDetecoButton
function TestedeDetecoButtonPushed(app, event)
    I = snapshot(app.camera);
    X = imcrop(I,app.pos_rect);

    diffFrame = imsubtract(X(:,:,1), rgb2gray(X)); % Get red
component of the image
    diffFrame = medfilt2(diffFrame, [app.FiltroRudoX
app.FiltroRudoY]); % Filter out the noise by using median filter
    binFrame = imbinarize(diffFrame, app.LimiarBinrio); %
Convert the image into binary image with the red objects as white

%JRB -----
-----

    imshow(binFrame, 'Parent', app.UIAxes2);
%JRB -----
-----

end

% Button pushed function: TesteCentrosButton
function TesteCentrosButtonPushed(app, event)
    hblob = vision.BlobAnalysis('AreaOutputPort', false, ... %
Set blob analysis handling
                                'CentroidOutputPort', true, ...
                                'BoundingBoxOutputPort', true', ...
                                'MinimumBlobArea', app.AreaMnimaLaser, ...
                                'MaximumBlobArea', app.AreaMximaLaser, ...
                                'MaximumCount', 2);

    I = snapshot(app.camera);
    X = imcrop(I,app.pos_rect);
    diffFrame = imsubtract(X(:,:,1), rgb2gray(X)); % Get red
component of the image
    diffFrame = medfilt2(diffFrame, [app.FiltroRudoX
app.FiltroRudoY]); % Filter out the noise by using median filter
    binFrame = imbinarize(diffFrame, app.LimiarBinrio); %
Convert the image into binary image with the red objects as white
    [centroid, bbox] = step(hblob, binFrame); % Get the
centroids and bounding boxes of the blobs
    centroid = uint16(centroid);
    for object = 1:1:length(bbox(:,1)) % Write the
corresponding centroids
        centX = centroid(object,1); centY = centroid(object,2);
        X = insertMarker(X, [centX centY;], 'size',10);
    end

%JRB -----
-----

    imshow(X, 'Parent', app.UIAxes2);
%JRB -----
-----

```

```

end

% Button pushed function: ResetarButton
function ResetarButtonPushed(app, event)
    app.ParadoLamp.Color = 'red';
    app.NomeEditField.Value = '';
    app.AprendizadoCheckBox.Enable= "on";
    app.MduloelasticidadeLabel_2.Text = '... Mpa';
    app.LimiteelasticoLabel.Text = '... Mpa';
    app.LimiteResistenciaLabel.Text = '... Mpa';

    clear app.A;
    clear app.B;
    clear app.C;
    app.A = [];
    app.B = [];
    app.C = [];
    app.stopLiveCam = 1;
    app.ArquivoLido = 0;
    cla(app.UIAxes);
    plot(app.UIAxes,app.B,app.A,"Color",[0 0 1], "LineWidth",2);
    plot(app.UIAxes2,app.B,app.A);
    app.FpsLabel.Text = sprintf('%2.2f', 0);
    drawnow;
    clear app.ard;
    while 1
        writeline(app.ard, "5");
        data = str2double(readline(app.ard))/app.Escala;
        if ~isempty(data)
            %app.ArquivoDadosEditField.Value =
mfilename('fullpath');
            writeline(app.ard, "6");
            break;
        end
    end
end

% Value changed function: SalvarVideoButton
function SalvarVideoButtonValueChanged(app, event)
    fileName = strcat(mfilename('fullpath'),'\'',
string(app.Material),...
        string(app.ComprimentotilmmEditField.Value), 'mm',
string(app.SeccaoCorpoProva), 'mm2', ...
        string(datetime('now','format','HH_mm')),'.avi');
    writerObj = VideoWriter(fileName,'Uncompressed AVI');
    TesteTime = seconds(app.execDate(end)-app.execDate(1));
    writerObj.FrameRate = round(length(app.videoFrames)/TesteTime);
    %% % writerObj.FrameRate = 25;% JRB era = 3;
    open(writerObj);
    % write the frames to the video
    for n=1 : length(app.videoFrames)
        if(~isempty(app.videoFrames{n}))
            writeVideo(writerObj, app.videoFrames{n});
        end
    end
    % close the writer object
    close(writerObj);
end

% Button pushed function: SalvarDadosButton
function SalvarDadosButtonPushed(app, event)

```

```

Deformacao = transpose(app.A);
Tensao_Mpa = transpose(app.C);
Frame = transpose(app.B);
Forca_N = Tensao_Mpa * app.SeccaoCorpoProva;
Deformacao100 = Deformacao * (100 /
app.ComprimentotilmmEditField.Value);

%%if(app.SuavizarSwitch.Value == 'H')
% % % if (app.SuavizarButton.Value)
% % %     app.SuavizarButton.Text = "Suavizar ON";
% % %     ySmooth = smoothdata(app.A, app.ListBox.Value);
% % %     Deformacao = transpose(ySmooth);
% % %     xSmooth = smoothdata(app.C, app.ListBox.Value);
% % %     Tensao_Mpa = transpose(xSmooth);
% % % end

if (app.ArquivoLido == 0)
    TimeInicial = app.execDate(1);
    Etime_s = transpose(seconds(app.execDate() - TimeInicial));

    if (app.CargaButton.Value)
        T1 =
table(Etime_s,Deformacao,Forca_N,Deformacao100,Tensao_Mpa,...
        'VariableNames', {'Time(s)', 'Alongamento(mm)',
'Carga(N)', 'Alongamento %', 'Tensao(Mpa)'});
        fileName1 =
strcat(mfilename('fullpath'),'\\',string(app.Material),...
        string(app.ComprimentotilmmEditField.Value), 'mm',
string(app.SeccaoCorpoProva),'mm2_', ...
        string(datetime('now','format','HH_mm_ss')),
'.csv');
        if (app.AprendizadoCheckBox.Value == 1 &&
~isempty(app.NomeEditField.Value))
            SalvaAprendizado(app, app.NomeEditField, Deformacao100,
Tensao_Mpa, app.CargaMaxima, ...
                app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
app.ModuloYuong, app.CargaLimiteElastico, ...
                app.PosicaoElastico,
app.comprimentoPlastico);
            app.AprendizadoCheckBox.Value = 0;
            app.NomeEditField.Value = '';
        end
    else
        T1 = table(Etime_s,Frame, Deformacao
+app.ComprimentotilmmEditField.Value,...
        'VariableNames', {'Time(s)', 'Frame', 'Distancia
(mm)'});
        fileName1 = strcat(mfilename('fullpath'),'\\Dados_',...
        string(app.ComprimentotilmmEditField.Value), 'mm',
string(app.SeccaoCorpoProva),'mm2_', ...
        string(datetime('now','format','HH_mm_ss')),
'.csv');
        end
        writetable(T1,fileName1,'Delimiter',';');
    end

end

% Value changed function: CarregarButton
function CarregarButtonValueChanged(app, event)

```

```

clear app.A;
clear app.B;
clear app.C;
app.ArquivoLido = 1;
app.AprendizadoCheckBox.Value = 0;
app.AprendizadoCheckBox.Enable= "off";
app.stopLiveCam = 1;
plot(app.UIAxes,app.B,app.A,"Color",[0 0 1], "LineWidth",2);
plot(app.UIAxes2,app.B,app.A);
drawnow;
filePath = strcat(mfilename('fullpath'),'\\',
app.ArquivoDadosEditField.Value, '.csv');
T = readtable(filePath);
app.A = T.Alongamento_mm_;
app.C = T.Tensao_Mpa_;
plot(app.UIAxes,app.A, app.C,"Color",[0 0 1], "LineWidth",2);

%jrb -----
    app.UIAxes.NextPlot = 'add';
    [app.CargaMaxima, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
app.ModuloYuong, app.CargaLimiteElastico, ...
    app.DeslocamentoLimiteElastico, app.PosicaoElastico] =
PontosInteresse(app, app.C ,app.A );
    plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima,
app.CargaMaxima, 'b*');
    text(app.UIAxes, app.DeslocamentoNaCargaMaxima * .8,
app.CargaMaxima * .99, ...
        strcat('limite Resistência = ', num2str(app.CargaMaxima), '
Mpa'),'FontSize',14);
    plot(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
app.CargaLimiteElastico, 'r*');
    text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico * .8,
app.CargaLimiteElastico * .99, ...
        strcat('limite Elástico = ',
num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa'),'FontSize',14);
    text(app.UIAxes, app.DeslocamentoLimiteElastico,
app.CargaLimiteElastico * .8, ...
        strcat('Módulo de Yuong =
', num2str(app.ModuloYuong)), 'FontSize',14 );
    app.MduloelasticidadeLabel_2.Text =
strcat(num2str(app.ModuloYuong), ' Mpa');
    app.LimiteelasticoLabel.Text =
strcat(num2str(app.CargaLimiteElastico), ' Mpa');
    app.LimiteResistenciaLabel.Text =
strcat(num2str(app.CargaMaxima), ' Mpa');

%jrb -----

end

% Button pushed function: AplicarFiltroButton
function AplicarFiltroButtonPushed(app, event)
plot(app.UIAxes,zeros(1, 1), zeros(1, 1));
% % % ySmoothA = smoothdata(app.A, app.ListBox.Value);
% % % ySmoothC = smoothdata(app.C, app.ListBox.Value);
ySmoothA = smoothdata(app.A, app.SeleoFiltroDropDown.Value);
ySmoothC = smoothdata(app.C, app.SeleoFiltroDropDown.Value);
ySmoothC(end+1) = app.C(1);
ySmoothA(end+1) = ySmoothA(end);
plot(app.UIAxes,ySmoothA, ySmoothC, "LineWidth",1);
end

```

```

% Value changed function: ImagemokButton
function ImagemokButtonValueChanged(app, event)
    value = app.ImagemokButton.Value;
    if value == 0
        app.TestedeDetecoButton.Enable = "off";
        app.TesteCentrosButton.Enable = "off";
        app.EnsaioSwitch.Enable = "off";
        fig2crop = snapshot(app.camera);
        l = strfind(app.camera.Resolution, 'x');
        ResolutionCamXby2 =
round(str2double(app.camera.Resolution(1: l-1))/2);
        ResolutionCamYby20 =
round(str2double(app.camera.Resolution(l+1 : ...
            length(app.camera.Resolution)))*.075);
        ResolutionCamY = round(str2double(app.camera.Resolution(l+1
: ...
            length(app.camera.Resolution))));
        app.pos_rect = [ResolutionCamXby2-ResolutionCamYby20 0 2
*...
            ResolutionCamYby20 ResolutionCamY];

        while 1
            tic
            NewImagem = imcrop(fig2crop, app.pos_rect);
            imshow(NewImagem, 'Parent', app.UIAxes2);
            fig2crop = snapshot(app.camera);

            newt = toc;
            fps = (1/newt);
            app.FpsLabel.Text = sprintf('%2.2f', fps);
            drawnow;
            if (app.ImagemokButton.Value == 1)
                app.TestedeDetecoButton.Enable = "on";
                app.TesteCentrosButton.Enable = "on" ;
                app.EnsaioSwitch.Enable = "on";
                break;
            end
            writeline(app.ard, "5");
            data = str2double(readline(app.ard))/app.Escala;
            app.CelCargaLabelValue.Text =
strcat(sprintf('%0.1f', data), ' Kg');
            app.ForLabel.Text = 'Força: ';
        end

    end
end

% Value changed function: DINSwitch
function DINSwitchValueChanged(app, event)
    value = app.DINSwitch.Value;
    if value == 0
        app.DimetrommEditField.Enable = "on";
        app.DimetrommEditField.Editable = "on";
        app.DimetrommEditField.Visible = "on";
        app.LargurammEditField.Enable = "off";
        app.LargurammEditField.Editable = "off";
        app.LargurammEditField.Visible = "off";
        app.EspessurammEditField.Enable = "off";
        app.EspessurammEditField.Editable = "off";
        app.EspessurammEditField.Visible = "off";
        app.DimetrommEditFieldLabel.Enable = "on";

```

```

app.DimetrommEditFieldLabel.Visible = "on";
app.LargurammEditFieldLabel.Enable = "off";
app.LargurammEditFieldLabel.Visible = "off";
app.EspessurammEditFieldLabel.Enable = "off";
app.EspessurammEditFieldLabel.Visible = "off";
else
app.DimetrommEditField.Enable = "off";
app.DimetrommEditField.Editable = "off";
app.DimetrommEditField.Visible = "off";
app.LargurammEditField.Enable = "on";
app.LargurammEditField.Editable = "on";
app.LargurammEditField.Visible = "on";
app.EspessurammEditField.Enable = "on";
app.EspessurammEditField.Editable = "on";
app.EspessurammEditField.Visible = "on";
app.DimetrommEditFieldLabel.Enable = "off";
app.DimetrommEditFieldLabel.Visible = "off";
app.LargurammEditFieldLabel.Enable = "on";
app.LargurammEditFieldLabel.Visible = "on";
app.EspessurammEditFieldLabel.Enable = "on";
app.EspessurammEditFieldLabel.Visible = "on";
end
end

% Value changed function: NomeEditField
function NomeEditFieldValueChanged(app, event)
app.Material = app.NomeEditField.Value;
arq = lower(strcat(mfilename('fullpath'), '\', ...
    string(app.Material), '.txt'));
if isfile(arq)
    %f = msgbox("Material Existente!", "Aviso", "non-modal");
app.MatrizAprendizado = readmatrix(arq);
% gerar curva auxiliar
[NovoLimElasY, NovoLimElasX, ~, Deform, Forca, XElas]
=CurvaAprendizado(app, ...
    app.MatrizAprendizado(1,:), app.comprimentoPlastico);
plot(app.UIAxes, Deform, Forca, 'Color', '[0.6350 0.0780
0.1840]',LineStyle='--');
app.UIAxes.NextPlot = 'add';
end

end

% Selection changed function: EixoYButtonGroup
function EixoYButtonGroupSelectionChanged(app, event)
selectedButton = app.EixoYButtonGroup.SelectedObject;
if (app.ImagemButton.Value)
    ylabel(app.UIAxes, 'Frame')
end
if (app.CargaButton.Value)
    ylabel(app.UIAxes, 'Tensão (Mpa)')
end
end

% Changes arrangement of the app based on UIFigure width
function updateAppLayout(app, event)
currentFigureWidth = app.VdeoExtensmetroUIFigure.Position(3);
if(currentFigureWidth <= app.onePanelWidth)
    % Change to a 3x1 grid
app.GridLayout.RowHeight = {745, 745, 745};
app.GridLayout.ColumnWidth = {'1x'};
app.CenterPanel.Layout.Row = 1;
end
end

```

```

    app.CenterPanel.Layout.Column = 1;
    app.LeftPanel.Layout.Row = 2;
    app.LeftPanel.Layout.Column = 1;
    app.RightPanel.Layout.Row = 3;
    app.RightPanel.Layout.Column = 1;
elseif (currentFigureWidth > app.onePanelWidth &&
currentFigureWidth <= app.twoPanelWidth)
    % Change to a 2x2 grid
    app.GridLayout.RowHeight = {745, 745};
    app.GridLayout.ColumnWidth = {'1x', '1x'};
    app.CenterPanel.Layout.Row = 1;
    app.CenterPanel.Layout.Column = [1,2];
    app.LeftPanel.Layout.Row = 2;
    app.LeftPanel.Layout.Column = 1;
    app.RightPanel.Layout.Row = 2;
    app.RightPanel.Layout.Column = 2;
else
    % Change to a 1x3 grid
    app.GridLayout.RowHeight = {'1x'};
    app.GridLayout.ColumnWidth = {394, '1x', 200};
    app.LeftPanel.Layout.Row = 1;
    app.LeftPanel.Layout.Column = 1;
    app.CenterPanel.Layout.Row = 1;
    app.CenterPanel.Layout.Column = 2;
    app.RightPanel.Layout.Row = 1;
    app.RightPanel.Layout.Column = 3;
end
end
end

% Component initialization
methods (Access = private)

    % Create UIFigure and components
    function createComponents(app)

        % Get the file path for locating images
        pathToMLAPP = fileparts(mfilename('fullpath'));

        % Create VdeoExtensmetroUIFigure and hide until all components
are created
        app.VdeoExtensmetroUIFigure = uifigure('Visible', 'off');
        app.VdeoExtensmetroUIFigure.AutoResizeChildren = 'off';
        app.VdeoExtensmetroUIFigure.Color = [0.9412 0.9412 0.9412];
        app.VdeoExtensmetroUIFigure.Position = [0 0 1500 745];
        app.VdeoExtensmetroUIFigure.Name = 'VÍdeo Extensômetro ';
        app.VdeoExtensmetroUIFigure.Icon = fullfile(pathToMLAPP,
'JRB.png');
        app.VdeoExtensmetroUIFigure.SizeChangedFcn =
createCallbackFcn(app, @updateAppLayout, true);
        app.VdeoExtensmetroUIFigure.WindowState = 'maximized';

        % Create GridLayout
        app.GridLayout = uigridlayout(app.VdeoExtensmetroUIFigure);
        app.GridLayout.ColumnWidth = {394, '1x', 200};
        app.GridLayout.RowHeight = {'1x'};
        app.GridLayout.ColumnSpacing = 0;
        app.GridLayout.RowSpacing = 0;
        app.GridLayout.Padding = [0 0 0 0];
        app.GridLayout.Scrollable = 'on';

        % Create LeftPanel

```

```

app.LeftPanel = uipanel(app.GridLayout);
app.LeftPanel.BorderType = 'none';
app.LeftPanel.TitlePosition = 'centertop';
app.LeftPanel.Title = 'Ajustes';
app.LeftPanel.Layout.Row = 1;
app.LeftPanel.Layout.Column = 1;
app.LeftPanel.FontSize = 18;

% Create Panel
app.Panel = uipanel(app.LeftPanel);
app.Panel.AutoResizeChildren = 'off';
app.Panel.Position = [22 11 302 698];

% Create CorpodeProvasPanel
app.CorpodeProvasPanel = uipanel(app.Panel);
app.CorpodeProvasPanel.AutoResizeChildren = 'off';
app.CorpodeProvasPanel.Title = 'Corpo de Provas';
app.CorpodeProvasPanel.Position = [8 508 286 182];

% Create ComprimentotilmmEditFieldLabel
uilabel(app.CorpodeProvasPanel);
app.ComprimentotilmmEditFieldLabel.Position = [10 131 142 22];
app.ComprimentotilmmEditFieldLabel.Text = 'Comprimento Útil
(mm)';

% Create DimetrommEditFieldLabel
app.DimetrommEditFieldLabel = uilabel(app.CorpodeProvasPanel);
app.DimetrommEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.DimetrommEditFieldLabel.Position = [107 6 87 22];
app.DimetrommEditFieldLabel.Text = 'Diâmetro (mm)';

% Create ComprimentotilmmEditField
uieditfield(app.CorpodeProvasPanel, 'numeric');
app.ComprimentotilmmEditField.Limits = [0 Inf];
app.ComprimentotilmmEditField.ValueDisplayFormat = '%5.2f';
app.ComprimentotilmmEditField.HorizontalAlignment = 'left';
app.ComprimentotilmmEditField.Position = [167 131 109 22];
app.ComprimentotilmmEditField.Value = 100;

% Create DimetrommEditField
app.DimetrommEditField = uieditfield(app.CorpodeProvasPanel,
'numeric');
app.DimetrommEditField.Limits = [0 Inf];
app.DimetrommEditField.Position = [210 6 66 22];
app.DimetrommEditField.Value = 0.05;

% Create DINSwitch
app.DINSwitch = uiswitch(app.CorpodeProvasPanel, 'rocker');
app.DINSwitch.Items = {'Cilíndrico', 'Retangular'};
app.DINSwitch.ItemsData = [0 1];
app.DINSwitch.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@DINSwitchValueChanged, true);
app.DINSwitch.Position = [26 30 27 61];
app.DINSwitch.Value = 0;

% Create LargurammEditFieldLabel
app.LargurammEditFieldLabel = uilabel(app.CorpodeProvasPanel);
app.LargurammEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.LargurammEditFieldLabel.Enable = 'off';
app.LargurammEditFieldLabel.Visible = 'off';

```

```

app.LargurammEditFieldLabel.Position = [107 89 78 22];
app.LargurammEditFieldLabel.Text = 'Largura (mm)';

% Create LargurammEditField
app.LargurammEditField = uieditfield(app.CorpodeProvasPanel,
'numeric');
app.LargurammEditField.Limits = [0 Inf];
app.LargurammEditField.Editable = 'off';
app.LargurammEditField.Enable = 'off';
app.LargurammEditField.Visible = 'off';
app.LargurammEditField.Position = [210 89 66 22];
app.LargurammEditField.Value = 0.05;

% Create EspessurammEditFieldLabel
app.EspessurammEditFieldLabel =
uicontrol(app.CorpodeProvasPanel);
app.EspessurammEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.EspessurammEditFieldLabel.Enable = 'off';
app.EspessurammEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.EspessurammEditFieldLabel.Position = [107 58 93 22];
app.EspessurammEditFieldLabel.Text = 'Espessura (mm)';

% Create EspessurammEditField
app.EspessurammEditField = uieditfield(app.CorpodeProvasPanel,
'numeric');
app.EspessurammEditField.Limits = [0 Inf];
app.EspessurammEditField.Editable = 'off';
app.EspessurammEditField.Enable = 'off';
app.EspessurammEditField.Visible = 'off';
app.EspessurammEditField.Position = [210 58 66 22];
app.EspessurammEditField.Value = 0.05;

% Create ConfiguraesGrficoPanel
app.ConfiguraesGrficoPanel = uipanel(app.Panel);
app.ConfiguraesGrficoPanel.AutoResizeChildren = 'off';
app.ConfiguraesGrficoPanel.Title = 'Configurações Gráfico';
app.ConfiguraesGrficoPanel.Position = [8 146 286 258];

% Create EixoXButtonGroup
app.EixoXButtonGroup =
uibuttongroup(app.ConfiguraesGrficoPanel);
app.EixoXButtonGroup.Title = 'Eixo X';
app.EixoXButtonGroup.Position = [6 167 274 62];

% Create DeformaoButton
app.DeformaoButton = uiradiobutton(app.EixoXButtonGroup);
app.DeformaoButton.Text = 'Deformação';
app.DeformaoButton.Position = [9 7 87 22];
app.DeformaoButton.Value = true;

% Create DistnciaButton
app.DistnciaButton = uiradiobutton(app.EixoXButtonGroup);
app.DistnciaButton.Text = 'Distância';
app.DistnciaButton.Position = [154 7 71 22];

% Create EixoYButtonGroup
app.EixoYButtonGroup =
uibuttongroup(app.ConfiguraesGrficoPanel);
app.EixoYButtonGroup.AutoResizeChildren = 'off';
app.EixoYButtonGroup.SelectionChangedFcn =
createCallbackFcn(app, @EixoYButtonGroupSelectionChanged, true);
app.EixoYButtonGroup.Title = 'Eixo Y';

```

```

app.EixoYButtonGroup.Position = [6 100 274 66];

% Create CargaButton
app.CargaButton = uiradiobutton(app.EixoYButtonGroup);
app.CargaButton.Text = 'Carga';
app.CargaButton.Position = [11 7 58 22];
app.CargaButton.Value = true;

% Create ImagemButton
app.ImagemButton = uiradiobutton(app.EixoYButtonGroup);
app.ImagemButton.Text = 'Imagem';
app.ImagemButton.Position = [154 7 65 22];

% Create Panel_2
app.Panel_2 = uipanel(app.ConfiguraesGrficoPanel);
app.Panel_2.AutoResizeChildren = 'off';
app.Panel_2.Title = 'Panel';
app.Panel_2.Position = [6 7 274 94];

% Create AplicarFiltroButton
app.AplicarFiltroButton = uibutton(app.Panel_2, 'push');
app.AplicarFiltroButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @AplicarFiltroButtonPushed, true);
app.AplicarFiltroButton.Position = [10 8 252 23];
app.AplicarFiltroButton.Text = 'Aplicar Filtro';

% Create FiltroLabel
app.FiltroLabel = uilabel(app.Panel_2);
app.FiltroLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.FiltroLabel.Position = [9 41 82 22];
app.FiltroLabel.Text = 'Seleção Filtro: ';

% Create SeleioFiltroDropDown
app.SeleoFiltroDropDown = uidropdown(app.Panel_2);
app.SeleoFiltroDropDown.Items = {'movmean', 'movmedian',
'gaussian', 'lowess', 'loess', 'rloess', 'rloess', 'sgolay'};
app.SeleoFiltroDropDown.Position = [105 42 157 22];
app.SeleoFiltroDropDown.Value = 'movmean';

% Create EnsaioSwitchLabel
app.EnsaioSwitchLabel = uilabel(app.Panel);
app.EnsaioSwitchLabel.HorizontalAlignment = 'center';
app.EnsaioSwitchLabel.VerticalAlignment = 'top';
app.EnsaioSwitchLabel.FontSize = 24;
app.EnsaioSwitchLabel.FontWeight = 'bold';
app.EnsaioSwitchLabel.Position = [13 11 84 31];
app.EnsaioSwitchLabel.Text = 'Ensaio';

% Create EnsaioSwitch
app.EnsaioSwitch = uiswitch(app.Panel, 'slider');
app.EnsaioSwitch.ItemsData = {'0', '1'};
app.EnsaioSwitch.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@initProcessVideo, true);
app.EnsaioSwitch.Enable = 'off';
app.EnsaioSwitch.FontSize = 14;
app.EnsaioSwitch.Position = [203 13 59 26];
app.EnsaioSwitch.Value = '0';

% Create ArquivoPanel
app.ArquivoPanel = uipanel(app.Panel);
app.ArquivoPanel.AutoResizeChildren = 'off';
app.ArquivoPanel.Title = 'Arquivo';

```

```

app.ArquivoPanel.Position = [8 65 286 82];

% Create ArquivoDadosEditFieldLabel
app.ArquivoDadosEditFieldLabel = uilabel(app.ArquivoPanel);
app.ArquivoDadosEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.ArquivoDadosEditFieldLabel.VerticalAlignment = 'top';
app.ArquivoDadosEditFieldLabel.Position = [7 36 89 15];
app.ArquivoDadosEditFieldLabel.Text = 'Arquivo Dados:';

% Create ArquivoDadosEditField
app.ArquivoDadosEditField = uieditfield(app.ArquivoPanel,
'text');
app.ArquivoDadosEditField.Position = [104 33 161 22];

% Create CarregarButton
app.CarregarButton = uibutton(app.ArquivoPanel, 'state');
app.CarregarButton.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@CarregarButtonValueChanged, true);
app.CarregarButton.Text = 'Carregar';
app.CarregarButton.Position = [12 4 256 23];

% Create TipoeNomedoMaterialButtonGroup
app.TipoeNomedoMaterialButtonGroup = uibuttongroup(app.Panel);
app.TipoeNomedoMaterialButtonGroup.AutoResizeChildren = 'off';
app.TipoeNomedoMaterialButtonGroup.Title = 'Tipo e Nome do
Material';
app.TipoeNomedoMaterialButtonGroup.Position = [8 403 286 106];

% Create MetlicoButton
app.MetlicoButton =
uiradiobutton(app.TipoeNomedoMaterialButtonGroup);
app.MetlicoButton.Text = 'Metálico';
app.MetlicoButton.Position = [12 52 67 22];
app.MetlicoButton.Value = true;

% Create PolietilenoButton
app.PolietilenoButton =
uiradiobutton(app.TipoeNomedoMaterialButtonGroup);
app.PolietilenoButton.Text = 'Polietileno';
app.PolietilenoButton.Position = [91 52 77 22];

% Create BorrachaButton
app.BorrachaButton =
uiradiobutton(app.TipoeNomedoMaterialButtonGroup);
app.BorrachaButton.Text = 'Borracha';
app.BorrachaButton.Position = [186 52 71 22];

% Create NomeEditFieldLabel
app.NomeEditFieldLabel =
uilabel(app.TipoeNomedoMaterialButtonGroup);
app.NomeEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.NomeEditFieldLabel.WordWrap = 'on';
app.NomeEditFieldLabel.Position = [10 19 60 22];
app.NomeEditFieldLabel.Text = 'Nome: ';

% Create NomeEditField
app.NomeEditField =
uieditfield(app.TipoeNomedoMaterialButtonGroup, 'text');
app.NomeEditField.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@NomeEditFieldValueChanged, true);
app.NomeEditField.Position = [78 18 183 23];

```

```

% Create CenterPanel
app.CenterPanel = uipanel(app.GridLayout);
app.CenterPanel.BorderType = 'none';
app.CenterPanel.TitlePosition = 'centertop';
app.CenterPanel.Title = 'Gráfico de Deformação';
app.CenterPanel.Layout.Row = 1;
app.CenterPanel.Layout.Column = 2;
app.CenterPanel.FontSize = 18;

% Create GridLayout3
app.GridLayout3 = uigridlayout(app.CenterPanel);
app.GridLayout3.ColumnWidth = {'1x', '1.59x', '0.25x', '1x',
'0.35x', '1x', '1x', '1x', '1x'};
app.GridLayout3.RowHeight = {'2x', '2x', '36.56x', '2x', '2x',
'2x'};
app.GridLayout3.Tag = 'Gráfico de Deformação';

% Create UIAxes
app.UIAxes = uiaxes(app.GridLayout3);
xlabel(app.UIAxes, 'Deformação')
ylabel(app.UIAxes, 'Tensão (Mpa)')
app.UIAxes.XTickLabelRotation = 0;
app.UIAxes.YTickLabelRotation = 0;
app.UIAxes.ZTickLabelRotation = 0;
app.UIAxes.XGrid = 'on';
app.UIAxes.YGrid = 'on';
app.UIAxes.Layout.Row = 3;
app.UIAxes.Layout.Column = [1 9];

% Create LimiteelsticoLabel
app.LimiteelsticoLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.LimiteelsticoLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.LimiteelsticoLabel.FontSize = 14;
app.LimiteelsticoLabel.Layout.Row = 6;
app.LimiteelsticoLabel.Layout.Column = 2;
app.LimiteelsticoLabel.Text = 'Limite elástico: ';

% Create SalvarDadosButton
app.SalvarDadosButton = uibutton(app.GridLayout3, 'push');
app.SalvarDadosButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@SalvarDadosButtonPushed, true);
app.SalvarDadosButton.Layout.Row = 1;
app.SalvarDadosButton.Layout.Column = 9;
app.SalvarDadosButton.Text = 'Salvar Dados';

% Create SalvarVideoButton
app.SalvarVideoButton = uibutton(app.GridLayout3, 'state');
app.SalvarVideoButton.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@SalvarVideoButtonValueChanged, true);
app.SalvarVideoButton.Text = 'Salvar Video';
app.SalvarVideoButton.Layout.Row = 1;
app.SalvarVideoButton.Layout.Column = 8;

% Create ResetarButton
app.ResetarButton = uibutton(app.GridLayout3, 'push');
app.ResetarButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@ResetarButtonPushed, true);
app.ResetarButton.BackgroundColor = [0.9412 0.9412 0.9412];
app.ResetarButton.Layout.Row = 1;
app.ResetarButton.Layout.Column = 7;
app.ResetarButton.Text = 'Resetar';

```

```

% Create FpsLabel
app.FpsLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.FpsLabel.Layout.Row = 1;
app.FpsLabel.Layout.Column = 6;
app.FpsLabel.Text = '0';

% Create FPSLabel
app.FPSLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.FPSLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.FPSLabel.FontWeight = 'bold';
app.FPSLabel.Layout.Row = 1;
app.FPSLabel.Layout.Column = 5;
app.FPSLabel.Text = 'FPS: ';

% Create LimiteResistenciaLabel
app.LimiteResistenciaLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.LimiteResistenciaLabel.FontSize = 14;
app.LimiteResistenciaLabel.Layout.Row = 4;
app.LimiteResistenciaLabel.Layout.Column = [3 6];
app.LimiteResistenciaLabel.Text = 'Limite Resistencia';

% Create LimiteresistnciaLabel
app.LimiteresistnciaLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.LimiteresistnciaLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.LimiteresistnciaLabel.FontSize = 14;
app.LimiteresistnciaLabel.Layout.Row = 4;
app.LimiteresistnciaLabel.Layout.Column = 2;
app.LimiteresistnciaLabel.Text = 'Limite resistêcia: ';

% Create ParadoLabel
app.ParadoLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.ParadoLabel.FontSize = 14;
app.ParadoLabel.FontWeight = 'bold';
app.ParadoLabel.Layout.Row = 1;
app.ParadoLabel.Layout.Column = 4;
app.ParadoLabel.Text = 'Parado';

% Create ParadoLamp
app.ParadoLamp = uilamp(app.GridLayout3);
app.ParadoLamp.Layout.Row = 1;
app.ParadoLamp.Layout.Column = 3;
app.ParadoLamp.Color = [1 0 0];

% Create CelCargaLabelValue
app.CelCargaLabelValue = uilabel(app.GridLayout3);
app.CelCargaLabelValue.VerticalAlignment = 'top';
app.CelCargaLabelValue.FontSize = 18;
app.CelCargaLabelValue.Layout.Row = 4;
app.CelCargaLabelValue.Layout.Column = [8 9];
app.CelCargaLabelValue.Text = '0 ';

% Create MduloeelasticidadeLabel_2
app.MduloeelasticidadeLabel_2 = uilabel(app.GridLayout3);
app.MduloeelasticidadeLabel_2.FontSize = 14;
app.MduloeelasticidadeLabel_2.Layout.Row = 5;
app.MduloeelasticidadeLabel_2.Layout.Column = [3 6];
app.MduloeelasticidadeLabel_2.Text = 'Módulo elasticidade ';

% Create MduloeelasticidadeLabel
app.MduloeelasticidadeLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.MduloeelasticidadeLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.MduloeelasticidadeLabel.FontSize = 14;

```

```

app.MduloelasticidadeLabel.Layout.Row = 5;
app.MduloelasticidadeLabel.Layout.Column = 2;
app.MduloelasticidadeLabel.Text = 'Módulo elasticidade: ';

% Create Label
app.Label = uilabel(app.GridLayout3);
app.Label.Tag = 'Deformacao';
app.Label.FontSize = 18;
app.Label.Layout.Row = 5;
app.Label.Layout.Column = [8 9];
app.Label.Text = '0';

% Create DeformaoLabel
app.DeformaoLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.DeformaoLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.DeformaoLabel.FontSize = 18;
app.DeformaoLabel.Layout.Row = 5;
app.DeformaoLabel.Layout.Column = 7;
app.DeformaoLabel.Text = 'Deformação: ';

% Create LimiteelasticoLabel
app.LimiteelasticoLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.LimiteelasticoLabel.FontSize = 14;
app.LimiteelasticoLabel.Layout.Row = 6;
app.LimiteelasticoLabel.Layout.Column = [3 6];
app.LimiteelasticoLabel.Text = 'Limite elastico';

% Create ForaLabel
app.ForLabel = uilabel(app.GridLayout3);
app.ForLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.ForLabel.VerticalAlignment = 'top';
app.ForLabel.FontSize = 18;
app.ForLabel.Layout.Row = 4;
app.ForLabel.Layout.Column = 7;
app.ForLabel.Text = 'Força: ';

% Create AprendizadoCheckBox
app.AprendizadoCheckBox = uicheckbox(app.GridLayout3);
app.AprendizadoCheckBox.Text = 'Aprendizado';
app.AprendizadoCheckBox.Layout.Row = 2;
app.AprendizadoCheckBox.Layout.Column = 9;

% Create RightPanel
app.RightPanel = uipanel(app.GridLayout);
app.RightPanel.BorderType = 'none';
app.RightPanel.TitlePosition = 'centertop';
app.RightPanel.Title = 'Vídeo';
app.RightPanel.Layout.Row = 1;
app.RightPanel.Layout.Column = 3;
app.RightPanel.FontSize = 18;

% Create GridLayout2
app.GridLayout2 = uigridlayout(app.RightPanel);
app.GridLayout2.ColumnWidth = {106, 61};
app.GridLayout2.RowHeight = {'1x', '3.26x', 23, 23, 23};

% Create UIAxes2
app.UIAxes2 = uiaxes(app.GridLayout2);
app.UIAxes2.XTick = [];
app.UIAxes2.XTickLabelRotation = 0;
app.UIAxes2.YTick = [];
app.UIAxes2.YTickLabelRotation = 0;

```

```

app.UIAxes2.ZTickLabelRotation = 0;
app.UIAxes2.FontSize = 8;
app.UIAxes2.Layout.Row = [1 2];
app.UIAxes2.Layout.Column = [1 2];

% Create ImagemokButton
app.ImagemokButton = uibutton(app.GridLayout2, 'state');
app.ImagemokButton.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@ImagemokButtonValueChanged, true);
app.ImagemokButton.Tag = 'Fim';
app.ImagemokButton.Text = 'Imagem ok';
app.ImagemokButton.Layout.Row = 3;
app.ImagemokButton.Layout.Column = [1 2];
app.ImagemokButton.Value = true;

% Create TestedeDetecoButton
app.TestedeDetecoButton = uibutton(app.GridLayout2, 'push');
app.TestedeDetecoButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @TestedeDetecoButtonPushed, true);
app.TestedeDetecoButton.Enable = 'off';
app.TestedeDetecoButton.Layout.Row = 4;
app.TestedeDetecoButton.Layout.Column = [1 2];
app.TestedeDetecoButton.Text = 'Teste de Detecção';

% Create TesteCentrosButton
app.TesteCentrosButton = uibutton(app.GridLayout2, 'push');
app.TesteCentrosButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@TesteCentrosButtonPushed, true);
app.TesteCentrosButton.Enable = 'off';
app.TesteCentrosButton.Layout.Row = 5;
app.TesteCentrosButton.Layout.Column = [1 2];
app.TesteCentrosButton.Text = 'Teste Centros';

% Show the figure after all components are created
app.VdeoExtensmetroUIFigure.Visible = 'on';
end
end

% App creation and deletion
methods (Access = public)

% Construct app
function app = appAC

% Create UIFigure and components
createComponents(app)

% Register the app with App Designer
registerApp(app, app.VdeoExtensmetroUIFigure)

% Execute the startup function
runStartupFcn(app, @startupFcn)

if nargin == 0
    clear app
end
end

% Code that executes before app deletion
function delete(app)

% Delete UIFigure when app is deleted

```

```
delete(app.VdeoExtensmetroUIFigure)
end
end
end
```