



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ ARAÚJO DE LIMA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO AUTOMATIZADO PARA ENSAIOS
DE FLEXÃO INSTRUMENTADO POR RASTREAMENTO ÓPTICO DE
DESLOCAMENTO**

Cabo de Santo Agostinho - PE

2026

JOSÉ ARAÚJO DE LIMA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO AUTOMATIZADO PARA ENSAIOS
DE FLEXÃO INSTRUMENTADO POR RASTREAMENTO ÓPTICO DE
DESLOCAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Unidade Acadêmica
do Cabo de Santo Agostinho da Universidade
Federal Rural de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: José Holanda da Silva Júnior

Cabo de Santo Agostinho - PE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Denize Souza – CRB-4 2046

L732d Lima Neto, José Araújo de.
Desenvolvimento de um dispositivo automatizado para ensaios de flexão instrumentado por rastreamento óptico de deslocamento / José Araújo de Lima Neto. – Cabo de Santo Agostinho, 2026.
80 f.

Orientador(a): José Holanda da Silva Júnior.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho - UACSA, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Cabo de Santo Agostinho, BR-PE, 2026.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Propriedades mecânicas. 2. Flexão (Engenharia civil) - Métodos. 3. Instrumentação mecânica. 4. Arduino (Controlador programável) 5. Automação. I. Silva Júnior, José Holanda da, orient. II. Título

CDD 620.1

JOSÉ ARAÚJO DE LIMA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO AUTOMATIZADO PARA ENSAIOS
DE FLEXÃO INSTRUMENTADO POR RASTREAMENTO ÓPTICO DE
DESLOCAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 09/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior (Presidente/Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Erb Ferreira Lins (Examinador 1)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. João Gutemberg Barbosa de Farias Filho (Examinador 2)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que sempre foram uma fonte de exemplo e a base de tudo o que sou. Aos meus avós, que sempre foram exemplos de luta e orgulho. E a todos que, de certa forma, acreditaram no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, minha eterna gratidão aos meus pais, Natanael Araújo e Ângela Maria. À minha irmã, Estelar Araújo, obrigado pela cumplicidade. Agradeço a vocês por todo o sacrifício, pelo incentivo constante e por acreditarem na minha vitória, mesmo quando ela parecia distante. Essa conquista também é de vocês.

Obrigado a todos da minha família, por sempre torcerem por mim e por servirem de pilar para minha educação, mesmo estando distantes.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em especial ao corpo docente do curso de Engenharia Mecânica, pela excelência no ensino e por todas as oportunidades de crescimento proporcionadas ao longo destes anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior, pela paciência, pelas diretrizes valiosas e por ter aceitado o desafio de guiar este projeto. Seu conhecimento técnico e sua disponibilidade foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Aos meus valiosos amigos e colegas, em especial a Arthur Soares, João Gabriel e Ruan Felipe, pelo companheirismo, pelas noites de estudo compartilhadas e pelo apoio nos momentos difíceis. Sem vocês, essa jornada não seria a mesma; a amizade de vocês tornou essa caminhada mais leve.

Agradeço aos meus amigos e colegas do ensino médio, por sempre me ajudarem em todos os quesitos da vida e por estarem presentes até hoje em minha trajetória.

A todos os meus professores que incentivaram meu aprendizado e me ajudaram a descobrir meu sonho.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

“Precisamos estar dispostos a nos livrar da vida que planejamos, para podermos viver a vida que nos espera. A pele velha tem que cair para que uma nova possa nascer.”

(Joseph Campbell)

RESUMO

A determinação precisa das propriedades mecânicas de materiais é essencial para o desenvolvimento de componentes estruturais, sensores e filmes finos na engenharia moderna. No entanto, a caracterização desses materiais enfrenta desafios logísticos e econômicos, uma vez que máquinas universais de ensaios comerciais possuem custos elevados, restringindo o acesso em laboratórios de ensino e pesquisa com recursos limitados. Diante deste cenário, este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um protótipo automatizado de valor mais econômico para a medição de tensões mecânicas, utilizando o método de flexão em três pontos. A metodologia baseou-se na integração de uma estrutura mecânica rígida, fabricada em alumínio, com um sistema de atuação controlado eletronicamente. O hardware utiliza um parafuso micrométrico acoplado a um motor de passo e gerenciado por um microcontrolador Arduino, garantindo a aplicação de deslocamentos com resolução micrométrica. Para o controle e processamento de dados, desenvolveu-se um software em linguagem Python que realiza a automação do sistema e a aquisição de imagens para análise de deformação por rastreamento óptico de deslocamento. Os resultados experimentais validaram a eficácia do sistema demonstrando alta correlação entre a curva de deslocamento comandado pelo motor e a deformação real mensurada opticamente. O dispositivo provou ser capaz de monitorar o comportamento de materiais flexíveis em tempo real, utilizando modelos elásticos teóricos para validar a integridade dos ensaios e alertar sobre limites operacionais de força, oferecendo uma alternativa de baixo custo para o estudo da engenharia garantindo qualidade de aprendizado.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas; Ensaio de flexão; Instrumentação mecânica; Arduino; Automação.

ABSTRACT

The precise determination of the mechanical properties of materials is essential for the development of structural components, sensors, and thin films in modern engineering. However, the characterization of these materials faces logistical and economic challenges, as commercial universal testing machines are highly expensive, restricting access for teaching and research laboratories with limited resources. Given this scenario, this work aimed to develop and validate a low-cost automated prototype for measuring mechanical stress using the three-point bending method. The methodology was based on integrating a rigid aluminum mechanical structure with an electronically controlled actuation system. The hardware utilizes a micrometer screw coupled to a stepper motor and controlled by an Arduino microcontroller, ensuring the application of displacements with micrometric resolution. For control and data processing, a Python-based software was developed to automate the system and acquire images for strain analysis via optical displacement tracking. Experimental results validated the system's effectiveness, demonstrating a high correlation between the motor-commanded displacement curve and the actual optically measured deformation. The device proved capable of monitoring the behavior of flexible materials in real time, employing theoretical elastic models to validate test integrity and warn about operational force limits, thereby offering a viable, low-cost alternative for engineering education while ensuring high-quality learning.

Keywords: Mechanical properties; Bending test; Mechanical instrumentation; Arduino; Automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Configuração do teste de flexão.....	21
Figura 2 – Esquema de montagem do controlador arduino com o motor de passo. .	28
Figura 3 – Primeiro conceito da estrutura mecânica.	30
Figura 4 – Placa de alumínio confeccionada.....	33
Figura 5 – Cabeçote fixo do medidor de tensões mecânicas.	34
Figura 6 – Componentes da estrutura mecânica impressos em 3D.....	35
Figura 7 – Dispositivo de punção.	36
Figura 8 – Gabarito de ensaio.	37
Figura 9 – Procedimento de calibração da resistência da mola.	39
Figura 10 – Linhas de tendência das 5 séries de medição para determinação da rigidez média.	40
Figura 11 – Motor de passo 28BYJ-48.....	42
Figura 12 – Integração do motor de passo com o Arduino.....	45
Figura 13 – Aplicativo de controle.	49
Figura 14 – Sistema de calibração da escala de medida.	53
Figura 15 – Tela do microscópio com escala calibrada.....	54
Figura 16 – Calibragem do microscópio.....	55
Figura 17 – Montagem do protótipo.	57
Figura 18 – Base de fixação da amostra.....	58
Figura 19 – Dispositivo de medição de tensão mecânica.	59
Figura 20 – Software de controle do dispositivo medidor de tensão mecânica.	60
Figura 21 – Teste em fio de liga de Sn60/Pb40.	65
Figura 22 – Teste em chapa de latão (Cu-Zn).....	67

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão normal de flexão
ϵ	Deformação específica
E	Módulo de elasticidade (Young)
δ	Deflexão (flecha) máxima no centro do vão
F	Carga aplicada
L	Comprimento do vão livre
b	Largura da seção transversal
h	Espessura da seção transversal
c	Distância da linha neutra à fibra mais externa
I	Momento de inércia de área

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVO GERAL	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLOGIA	17
2.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	17
2.2	TENSÃO E DEFORMAÇÃO	18
2.3	REGIME DE MEDIDAS (ELÁSTICO).....	19
2.4	ENSAIO DE FLEXÃO.....	20
2.4.1	Mecânica da Flexão.....	21
2.4.2	Modelagem da Flexão em Três Pontos.....	22
2.4.3	Análise do Diagrama Tensão x Deformação	24
2.5	INSTRUMENTAÇÃO MECATRÔNICA E CONTROLE.....	26
2.5.1	Atuadores: O Motor de Passo	26
2.5.2	Controlador e Aquisição de Dados.....	26
2.5.3	Integração de Hardware e Circuito de Potência.....	27
3	RESULTADOS	29
3.1	CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA.....	29
3.1.1	Materiais e Métodos	31
3.1.2	Componentes Mecânicos	32
3.1.3	Instalação do Parafuso Micrométrico	38
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA MOLA DE RETORNO E ANÁLISE DE CARGA ...	38
3.3	INTEGRAÇÃO DO MOTOR DE PASSO.....	41
3.3.1	Comunicação com Arduino	43
3.3.2	Montagem do Sistema Eletrônico	44
3.3.3	Comando do Motor de Passo	45

3.4	DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO E INTERFACE GRÁFICA	46
3.4.1	Arquitetura do Software e Bibliotecas Usadas.....	47
3.5	SISTEMA DE ANÁLISE ÓPTICA E CALIBRAÇÃO	51
3.5.1	Calibração Cinemática e Limites de Curso.....	52
3.5.2	Calibração Óptica e Fator de Escala	52
3.6	MONTAGEM DO PROTÓTIPO	56
3.7	ENSAIO MECÂNICO.....	61
3.7.1	Determinação da Força Aplicada	61
3.7.2	Medição da Deflexão Via Rastreamento Óptico de Deslocamento	63
3.7.3	Cálculo de Tensão Baseado no Modelo Elástico.....	63
3.8	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	64
3.8.1	Ensaio em Material Dúctil (Liga Sn60/Pb40).....	65
3.8.2	Ensaio em Material Rígido (Latão)	66
4	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71
	APÊNDICE A – DADOS BRUTOS DA CALIBRAÇÃO DA MOLA HELICOIDAL....	73
	APÊNDICE B – RELATÓRIOS GRÁFICOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	76

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho descreve o desenvolvimento e a validação de um protótipo de baixo custo voltado para ensaios mecânicos de flexão. Diferente das Máquinas Universais de Ensaio comerciais, que exigem um alto investimento, a solução proposta utiliza uma arquitetura baseada em microcontrolador Arduino, motor de passo e um sistema óptico para monitorar o deslocamento da amostra em vídeo. A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios com Latão e Estanho, foi possível comprovar a precisão da instrumentação desenvolvida.

A motivação para esse projeto surgiu da dificuldade prática de equipar laboratórios de pesquisa. Equipamentos comerciais de ensaio universal são robustos e alcançam precisão micrométrica, mas os custos de aquisição e manutenção são restritivos. Essa dependência financeira acaba limitando o avanço científico em laboratórios com recursos finitos. Para contornar esse problema logístico, o equipamento foi pensado como uma alternativa autônoma para ensaios de flexão, utilizando hardware aberto e um algoritmo para rastrear o deslocamento. O foco são amostras de maior sensibilidade, que não exigem cargas elevadas, permitindo que a deformação seja acompanhada apenas pelo vídeo do microscópio digital.

O objetivo central é consolidar um sistema barato que consiga cruzar o deslocamento mecânico do atuador com a resposta visual da peça, usando a teoria da mecânica dos sólidos para confirmar se a leitura está correta.

Para construir o dispositivo, a escolha natural foi a arquitetura de código aberto. O sistema integra componentes eletrônicos de fácil acesso na plataforma Arduino, programada em C++. Para controlar a máquina e capturar os dados, foi criado um software totalmente em Python. Essa integração automatiza os testes, gera a visualização gráfica em tempo real e facilita o tratamento estatístico dos dados, mantendo o rigor técnico por meio de uma interface simples e robusta.

O documento está estruturado acompanhando as fases práticas desse projeto mecatrônico. A fundamentação teórica revisa os princípios da resistência dos materiais e o processamento digital de imagens. A seguir, a metodologia detalha o desenho mecânico, a montagem eletrônica e o algoritmo em Python. Por fim, os resultados experimentais discutem os ensaios de calibração e comprovam a viabilidade técnica do dispositivo frente aos materiais de referência.

1.1 MOTIVAÇÃO

A Engenharia Mecânica, embora ampla, possui como pilares mais críticos a Ciência dos Materiais e a Metrologia. Para tornar qualquer projeto mecânico seguro e eficiente, é imprescindível conhecer o comportamento do material sob carga. Neste contexto, destaca-se a área de instrumentação e ensaios mecânicos, responsável por determinar parâmetros fundamentais como tensão de ruptura, módulo de elasticidade e limites de escoamento (Hibbeler, 2010). É crucial ter a capacidade de aferir essas propriedades experimentalmente para que o processo de design de componentes se torne dependente apenas de dados tabelados.

Diante de tal cenário, este trabalho surge motivado pela necessidade de desenvolver uma solução de instrumentação acessível e precisa dentro da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). O projeto foca na construção de um dispositivo para medição de tensões mecânicas através do método de flexão em três pontos, integrando a robustez mecânica com a eletrônica embarcada (Arduino) e o processamento de dados (Python). O objetivo é demonstrar que é possível obter dados confiáveis de caracterização de materiais com baixo custo, preenchendo a lacuna entre a teoria de resistência dos materiais e a prática experimental laboratorial.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um dispositivo de baixo custo para monitoramento de deformação em ensaios de flexão utilizando rastreamento óptico de deslocamento e controle de deslocamento.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um instrumento mecatrônico para a aplicação controlada de carga e aquisição de dados de deflexão;
- Desenvolver um sistema eletromecânico para controlar o medidor de tensões mecânicas;

- Associar o deslocamento mecânico do atuador com a deformação visual real da amostra;
- Determinar padrões nas tensões mecânicas via imagens para uso e implementar a técnica de rastreamento óptico de deslocamento para correlação entre deformação visual e tensão aplicada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLOGIA

O desenvolvimento de um instrumento de medição confiável exige o alinhamento rigoroso entre os fenômenos físicos analisados e as tecnologias empregadas para a aquisição de dados. Este capítulo estabelece as bases teóricas e matemáticas que sustentam o projeto do protótipo e a interpretação dos resultados experimentais.

A estrutura desta fundamentação divide-se nos três pilares tecnológicos que compõem o equipamento. Inicialmente, são revisados os conceitos fundamentais da Mecânica dos Sólidos, com ênfase na teoria de vigas e na mecânica dos ensaios de tração e flexão, essenciais para compreender as tensões e deformações que ocorrem nas amostras. Na sequência, abordam-se os princípios de instrumentação eletrônica e mecatrônica, detalhando a física por trás dos motores de passo e do controle em malha aberta. Por fim, o capítulo introduz os fundamentos teóricos do Processamento Digital de Imagens (PDI) e da visão computacional, base matemática que viabiliza a técnica de rastreamento óptico adotada para determinar os deslocamentos sem contato físico.

2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

O comportamento mecânico de um material pode ser verificado ao aplicar uma carga, que pode ser estática ou variar de maneira lenta ao longo do tempo, uniformemente onde toda a carga acontece sobre a superfície do elemento, o que configura como um simples ensaio de tensão-deformação. A forma mais comum de conduzir um ensaio geralmente ocorre em temperatura ambiente para os metais. A física permite que a carga, que é aplicada no centro do corpo de prova decorrer de três maneiras diferentes: tração, compressão e cisalhamento (Callister; Rethwisch, 2016).

Para entender a validação do protótipo desenvolvido, é preciso, primeiramente, definir as grandezas físicas que regem o comportamento do material sob carga. A característica desse estudo é guiada pela relação que a força externa exerce e a geometria do objeto de análise.

Para compreender melhor o comportamento dos materiais sob carga, o ensaio de tração uniaxial destaca-se como o método analítico mais fundamental da mecânica

dos sólidos. Neste ensaio, um corpo de prova com geometria padronizada é submetido a uma força de alongamento gradativa ao longo de seu eixo longitudinal até o instante de sua ruptura.

Durante o teste de tração, o equipamento registra continuamente a força aplicada e o alongamento resultante. Esses dados primários são convertidos, respectivamente, em tensão e deformação específica, gerando o diagrama de Tensão-Deformação. É a partir desta curva que se extraem as propriedades intrínsecas fundamentais do material, como o Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young, o Limite de Escoamento e o Limite de Resistência à Tração

Embora o escopo do presente projeto concentre-se na instrumentação do ensaio de flexão, a teoria da tração atua como o alicerce matemático e conceitual indispensável. Em uma viga, por exemplo, o momento fletor impõe, de forma simultânea, esforços de tração nas fibras de um dos lados da linha neutra e esforços de compressão nas fibras do lado oposto. Portanto, a extração de propriedades como o Módulo de Young por meio da flexão pressupõe o conhecimento prévio do comportamento do material sob tração.

2.2 TENSÃO E DEFORMAÇÃO

Conforme ilustrado na literatura técnica (Hibbeler, 2010), a resposta de um material a uma carga não depende apenas da força, mas da área sobre a qual ela atua. Define-se tensão normal (σ) como a força por unidade de área, expressa na equação (1):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

onde F é a carga naquele instante aplicada perpendicularmente à seção da área A_0 original da seção transversal.

De forma síncrona com a tensão, o material sofre alterações dimensionais. É definida a deformação específica (ϵ) como variação dimensional normalizada pelo comprimento original, o que acaba tornando-o uma grandeza adimensional, como podemos ver pela equação (2).

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

onde l_0 é o comprimento inicial, l_i é o comprimento instantâneo após a deformação e Δl é a variação do comprimento da amostra. Realizar a medição precisa dessas duas grandezas é o objetivo central do sistema de instrumentação para a elaboração do dispositivo proposto nesse trabalho.

2.3 REGIME DE MEDIDAS (ELÁSTICO)

Quando se analisa o diagrama de Tensão-Deformação de materiais sólidos, observa-se inicialmente uma região onde a relação entre σ e ϵ é linear. Este comportamento configura o Regime Elástico. Nesta fase é apresentado que a deformação é permanente, ou seja, quando se é removida a carga ao qual está sendo aplicada sob a amostra, o corpo de prova retorna às suas dimensões originais. Para a grande maioria dos metais e polímeros, quando submetidos a pequenas deformações, a tensão é diretamente proporcional à própria deformação, obedecendo assim à Lei de Hooke, expressa pela equação (3):

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

onde a constante de proporcionalidade é dada por E , chamado de Módulo de Elasticidade ou, também, comumente conhecido por Módulo de Young. Esta propriedade representa a rigidez do material, ou seja, sua resistência à deformação elástica. De forma análoga, quanto maior o módulo, menor será a deformação elástica para dada tensão aplicada.

Em contrapartida, é observado também o fenômeno da elasticidade sob a ótica da mecânica clássica. O comportamento elástico de sólidos pode ser comparado ao de uma mola helicoidal ideal. Segundo Halliday e Resnick (2012), têm-se pela lei de Hooke que a força restauradora (F) necessária para deformar um corpo elástico é diretamente proporcional ao deslocamento (x) sofrido pelo mesmo, dada pela equação (4):

$$F = k \cdot x \quad (4)$$

A constante de proporcionalidade k foi mensurada em N/m (Newton por metro). No Sistema Internacional de Unidades (SI), essa grandeza quantifica a rigidez linear do componente, indicando fisicamente a magnitude da força (em Newtons) necessária para provocar uma deformação. No contexto da instrumentação deste projeto, a Lei de Hooke é aplicada de duas formas distintas. Primeiramente, na caracterização da mola de retorno, onde a relação é utilizada para mapear a carga resistiva que o motor deve vencer durante a operação. Em segundo lugar, e mais importante, ela é utilizada como equação constitutiva do material (Equação 3) dentro do software de controle, servindo como modelo matemático de referência para validar se a deformação observada pela câmera corresponde ao comportamento elástico esperado para o material ensaiado.

Dessa forma, a formulação da Lei de Hooke expressa na Equação (3) estabelece a base matemática para a caracterização do material. É essa relação que permite que os dados brutos de Força e Deslocamento, coletados em tempo real pelo protótipo, sejam convertidos no diagrama de Tensão vs. Deformação. Essa conversão é realizada pelos algoritmos do software aplicando-se as equações geométricas específicas do ensaio, relacionando a carga mecânica imposta pelo atuador à geometria da seção transversal da amostra.

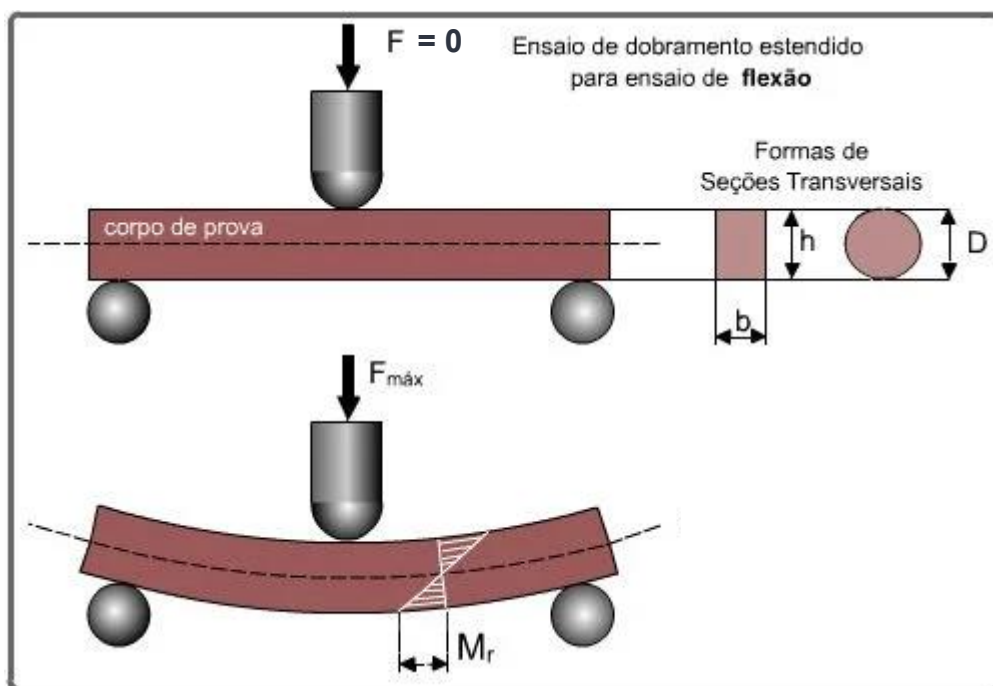
A determinação experimental do Módulo de Young é o objetivo primário dos ensaios realizados pelo protótipo. É de suma importância ressaltar que a validade dessa relação se encerra no ponto conhecido como Limite de Elasticidade, onde a linha no gráfico deixa de ser linear. Acima desse limite, o material entra no Regime Plástico, onde ocorrem deformações irreversíveis e permanentes, fase que deve ser evitada nos testes de validação inicial do sensor para garantir a integridade das amostras.

2.4 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio de flexão é uma técnica de caracterização mecânica amplamente utilizada para avaliar a resistência e a rigidez de materiais que, por razões geométricas ou estruturais, são difíceis de serem fixados em garras de ensaios de tração convencionais. A base desse método consiste na aplicação de uma carga perpendicular ao eixo longitudinal de um corpo de prova biapoado, provocando uma curvatura controlada. A imposição da carga transversal gera um momento fletor que

altera a geometria da peça. Como consequência, as fibras localizadas na face convexa da viga sofrem alongamento devido a esforços de tração, enquanto as fibras da face côncava sofrem encurtamento provocado por esforços de compressão. A transição entre esses dois regimes opostos ocorre ao longo de uma superfície interna teórica onde a deformação e a tensão normal é nula, conhecida como Linha Neutra. como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Configuração do teste de flexão.



Fonte: UFSC, 2010.

Por expor o material a um estado combinado de tração, compressão e cisalhamento, a análise matemática da flexão baseia-se em hipóteses simplificadoras da Teoria de Vigas, as quais são detalhadas nos tópicos a seguir para fundamentar a extração de dados do equipamento desenvolvido.

2.4.1 Mecânica da flexão

O ensaio de flexão em três pontos consiste em uma configuração isostática na qual o corpo de prova repousa livremente sobre dois suportes horizontais, atuando como uma viga biapoiada. A carga mecânica é aplicada de forma concentrada e perpendicular ao eixo longitudinal da amostra, sendo rigorosamente centralizada no

meio do vão útil (*span*) delimitado pelos dois apoios inferiores, ou seja, em $L/2$, onde L é a distância entre os suportes, e não o comprimento total da peça.

Do ponto de vista da Resistência dos Materiais, esse arranjo cinemático induz um diagrama de esforços em que o momento fletor atinge seu valor máximo exatamente na seção transversal central, sob o ponto de contato do cutelo de aplicação de força. Esse momento fletor máximo provoca respostas simultâneas e opostas na seção da viga: as fibras da face superior sofrem encurtamento devido a tensões de compressão, enquanto as fibras da face inferior sofrem alongamento impulsionado por tensões de tração.

A transição geométrica entre essas duas zonas de solicitação ocorre em uma superfície longitudinal interna onde a tensão normal e a deformação são nulas, denominada Linha Neutra (ou Eixo Neutro).

Consequentemente, as fibras mais distantes dessa linha neutra concentram os picos de tensão, tornando a seção central a região crítica do ensaio. É exatamente neste ponto que a deflexão máxima é mensurada pelo sistema óptico e onde o escoamento ou a ruptura do material tipicamente se iniciam.

2.4.2 Modelagem da flexão em três pontos

A determinação da tensão normal máxima (σ) na fibra externa do material está atrelada, principalmente, à geometria da seção transversal, tendo vista que no ensaio de flexão em três pontos, a distribuição de esforços não é uniforme ao longo do corpo de prova, que ocorre especificamente nas fibras mais externas da seção transversal central da amostra, localizada exatamente no meio do vão útil e é nesta região crítica que o material atinge o seu limite de resistência. Esta tensão está relacionada diretamente ao seu momento de inércia de área (I). A equação geral da tensão de flexão é dada pela equação (5):

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (5)$$

onde M é o momento fletor máximo ($M = F \cdot L/4$) e c é a distância da linha neutra até a superfície externa ($h/2$), em corpos de prova com seção retangular simétrica, essa distância equivale à metade da altura, dada em metros.

A seção transversal do corpo de prova pode ser tanto retangular quanto circular. Para as amostras retangulares temos b sendo a largura da seção transversal retangular, dada em metros, o momento de inércia para esta geometria é:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (6)$$

E sabendo que a distância da linha neutra até a fibra externa é $c = h/2$ ao substituir na equação (5), obtém-se a Tensão de Flexão (σ_f) para a seção retangular apresentada a seguir pela equação (7):

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (7)$$

Onde:

F: Carga aplicada (Newton - N);

É definida também para essa mesma seção a flecha máxima (δ), que corresponde ao deslocamento vertical no centro da viga, é determinada pela equação da linha elástica mostrada a seguir pela equação (8):

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} = \frac{FL^3}{4Ebh^3} \quad (8)$$

Já para a seção transversal circular utilizando corpos de prova cilíndricos com raio R (ou diâmetro d), momento de inércia calculado pela equação (9):

$$I = \frac{\pi \cdot R^4}{4} \quad (9)$$

Por sua vez, a distância da linha neutra até a fibra externa é o próprio valor do raio (R). Desta forma a tensão máxima assume a forma da equação (10):

$$\sigma_f = \frac{FL}{\pi R^3} \quad (10)$$

Analogamente, a flecha máxima para a geometria circular é calculada pela equação (11):

$$\delta = \frac{FL^3}{12\pi ER^4} \quad (11)$$

Esse conjunto de equações demonstram que a resistência à deflexão é sensível à geometria do corpo de prova, variando com a quarta potência do raio ou o cubo da largura.

2.4.3 Análise do Diagrama Tensão x Deformação

A caracterização do comportamento mecânico do material fundamenta-se na análise da curva Tensão versus Deformação. Embora o sistema de instrumentação colete dados primários em grandezas de força e flecha, é imprescindível a normalização desses valores para eliminar a dependência das dimensões geométricas da amostra, convertendo-os para tensão de flexão (σ_f) e deformação específica de flexão (ϵ_f) dada pela equação (12):

$$\epsilon_f = \frac{6 \cdot \delta \cdot h}{L^2} \quad (12)$$

Sob a ótica da análise gráfica, a curva resultante apresenta uma topologia análoga àquela obtida no ensaio de tração uniaxial convencional, permitindo identificar regiões distintas de comportamento elástico linear e plástico. No entanto, a interpretação física do fenômeno exige cautela, diferentemente da tração pura, onde a tensão é distribuída uniformemente por toda a seção transversal, na flexão ocorre um gradiente de tensões. Neste ensaio, o valor de σ_f plotado no gráfico não representa uma média, mas sim a tensão máxima atuante na fibra mais externa da amostra (tracionada ou comprimida). Portanto, embora o formato da curva sugira um comportamento similar ao da tração, os valores representam a resposta estrutural de

uma viga sujeita a um momento fletor, sendo a deformação específica calculada pela relação geométrica da curvatura (Callister; Rethwisch, 2016).

Diante da análise da curva Tensão-Deformação, é possível identificar as propriedades fundamentais, sendo parâmetros críticos para a caracterização do material:

- **Limite de Proporcionalidade (σ_{pl}):** Corresponde à tensão máxima na curva tensão-deformação até a qual o comportamento do material mantém-se linear. Nesta região, a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada, validando a aplicação da Lei de Hooke (Hibbeler, 2010).
- **Módulo de Elasticidade (E):** Também denominado Módulo de Young, esta propriedade quantifica a rigidez do material, sendo definida geometricamente como a inclinação da reta na região elástica linear (Callister; Rethwisch, 2016). No contexto do ensaio de flexão, o módulo pode ser determinado experimentalmente isolando-se E da equação da deflexão máxima, assim é obtido a equação (13):

$$E = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot h^3} \quad (13)$$

onde m representa o coeficiente angular da curva Carga *versus* Flecha (F/δ) obtido por regressão linear na fase elástica do ensaio.

- **Limite de Escoamento (σ_e):** Define o ponto de transição fenomênica entre o comportamento elástico (reversível) e o início da deformação plástica (permanente). Para materiais que não exibem uma transição nítida no gráfico, como é o caso de diversos polímeros e metais dúcteis, convencionou-se a utilização do método do *offset* (ou desvio) de 0,2% de deformação para a sua determinação gráfica (Callister, 2016).

Essa fundamentação teórica instrumenta o software desenvolvido para ir além da simples coleta de dados brutos, permitindo o processamento das variáveis

geométricas e cinemáticas que visam entregar uma caracterização mecânica completa da amostra ensaiada.

2.5 INSTRUMENTAÇÃO MECATRÔNICA E CONTROLE

A automação de ensaios mecânicos exige a integração de sistemas mecânicos com eletrônica e computação, caracterizando um sistema mecatrônico. Conforme define Bolton (2015), um sistema mecatrônico é composto por sensores (que monitoram o ambiente), atuadores (que produzem movimento) e um controlador (que processa as informações).

2.5.1 Atuadores: O Motor de Passo

Para a aplicação controlada de carga, utilizam-se atuadores que convertem sinais elétricos em movimento mecânico preciso. Bolton (2015) explica que os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos digitais em rotações angulares discretas (passos). Diferente dos motores de corrente contínua (DC) convencionais, os motores de passo permitem o controle de posição em malha aberta, ou seja, sem a necessidade de sensores de feedback de posição, desde que o torque do motor não seja excedido.

No contexto deste projeto, o uso de um motor de passo acoplado a um fuso (parafuso micrométrico) permite converter a rotação discreta em translação linear de alta resolução, essencial para aplicar microdeformações na amostra.

2.5.2 Controlador e Aquisição de Dados

O "cérebro" do sistema é o microcontrolador. Segundo Bolton (2015), microcontroladores são sistemas computacionais integrados em um único chip, contendo processador, memória e periféricos de entrada/saída (I/O). A plataforma Arduino (Arduino, 2026), utilizada neste trabalho, simplifica a prototipagem de sistemas de controle, permitindo o envio dos trens de pulso necessários para o driver do motor e a comunicação serial com computadores externos para o processamento de dados.

2.5.3 Integração de Hardware e Circuito de Potência

O sistema de controle é o elemento responsável pelo gerenciamento lógico e pela sincronização dos atuadores do dispositivo. Para este projeto, adotou-se a arquitetura baseada em sistemas embarcados, utilizando a plataforma de prototipagem Arduino Uno R3. Segundo Banzi e Shiloh (2015), esta placa baseia-se no microcontrolador ATmega328P, que oferece uma interface de entrada e saída (I/O) acessível e capacidade de comunicação serial via USB, características essenciais para a integração com computadores pessoais.

No entanto, as portas digitais do microcontrolador operam com níveis de tensão (5V) e corrente (aproximadamente 40mA por pino) insuficientes para o acionamento direto de cargas indutivas, como motores elétricos. Para solucionar essa discrepância de impedância e proteger o circuito lógico, faz-se necessária a utilização de uma interface de potência (Bolton, 2015).

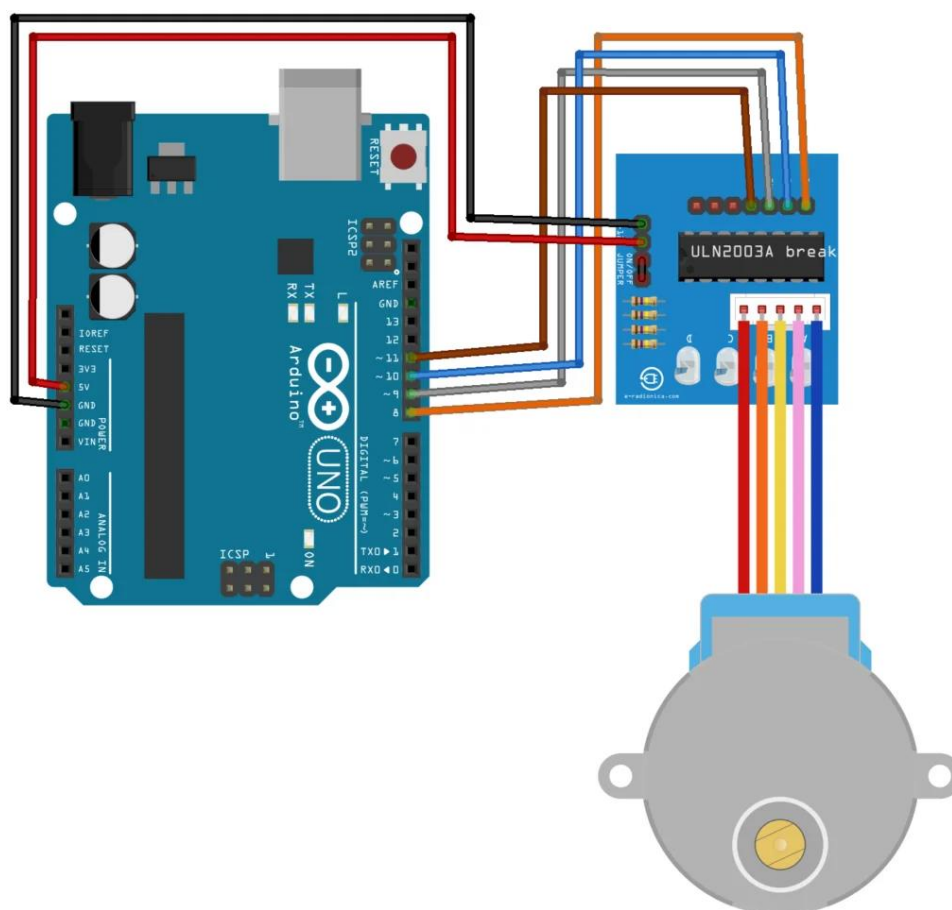
Neste protótipo, a interface é realizada pelo driver ULN2003, um circuito integrado composto por sete pares de transistores Darlington de alta tensão e alta corrente. Conforme descreve Thomazini e Albuquerque (2011), essa configuração permite que o driver receba os sinais lógicos de baixa potência provenientes de quatro pinos digitais do Arduino (IN1 a IN4) e comute a alimentação externa para as bobinas do motor, atuando como uma chave eletrônica robusta.

O atuador selecionado para aplicar a carga mecânica é o motor de passo 28BYJ-48. Trata-se de um motor unipolar de 5 fios, que se destaca por possuir um sistema de redução mecânica interna (caixa de engrenagens). Embora a velocidade de rotação seja reduzida, essa característica mecânica proporciona um aumento significativo no torque de saída e, crucialmente, na resolução angular do movimento. A combinação do motor de passo com a redução permite que o sistema realize deslocamentos incrementais extremamente finos no parafuso micrométrico, garantindo a precisão necessária para o ensaio de flexão.

A topologia de hardware final consiste na conexão física do Arduino a um computador via cabo USB, estabelecendo um canal de comunicação serial (UART). O computador envia os pacotes de dados contendo os comandos de direção e quantidade de passos; o microcontrolador processa essas informações e envia a sequência de pulsos elétricos para o driver ULN2003, que, por sua vez, energiza sequencialmente as bobinas do motor 28BYJ-48, convertendo a informação digital em

deslocamento mecânico preciso (Monk, 2017), a Figura 2 a seguir ilustra o esquema eletrônico do motor de passo.

Figura 2 – Esquema de montagem do controlador arduino com o motor de passo.



Fonte: Saravati, 2026.

3 RESULTADOS

O desenvolvimento deste trabalho pautou-se em uma abordagem experimental e quantitativa, focada na construção e validação de um protótipo mecatrônico para ensaios de materiais. Os resultados obtidos foram estruturados de maneira sistêmica, dividindo o projeto em quatro etapas fundamentais e interdependentes:

- (i) Projeto e manufatura da estrutura mecânica;
- (ii) Instrumentação eletrônica e controle de atuadores;
- (iii) Desenvolvimento de software para automação e aquisição de dados;
- (iv) Protocolo de calibração e validação experimental via análise manual e automática.

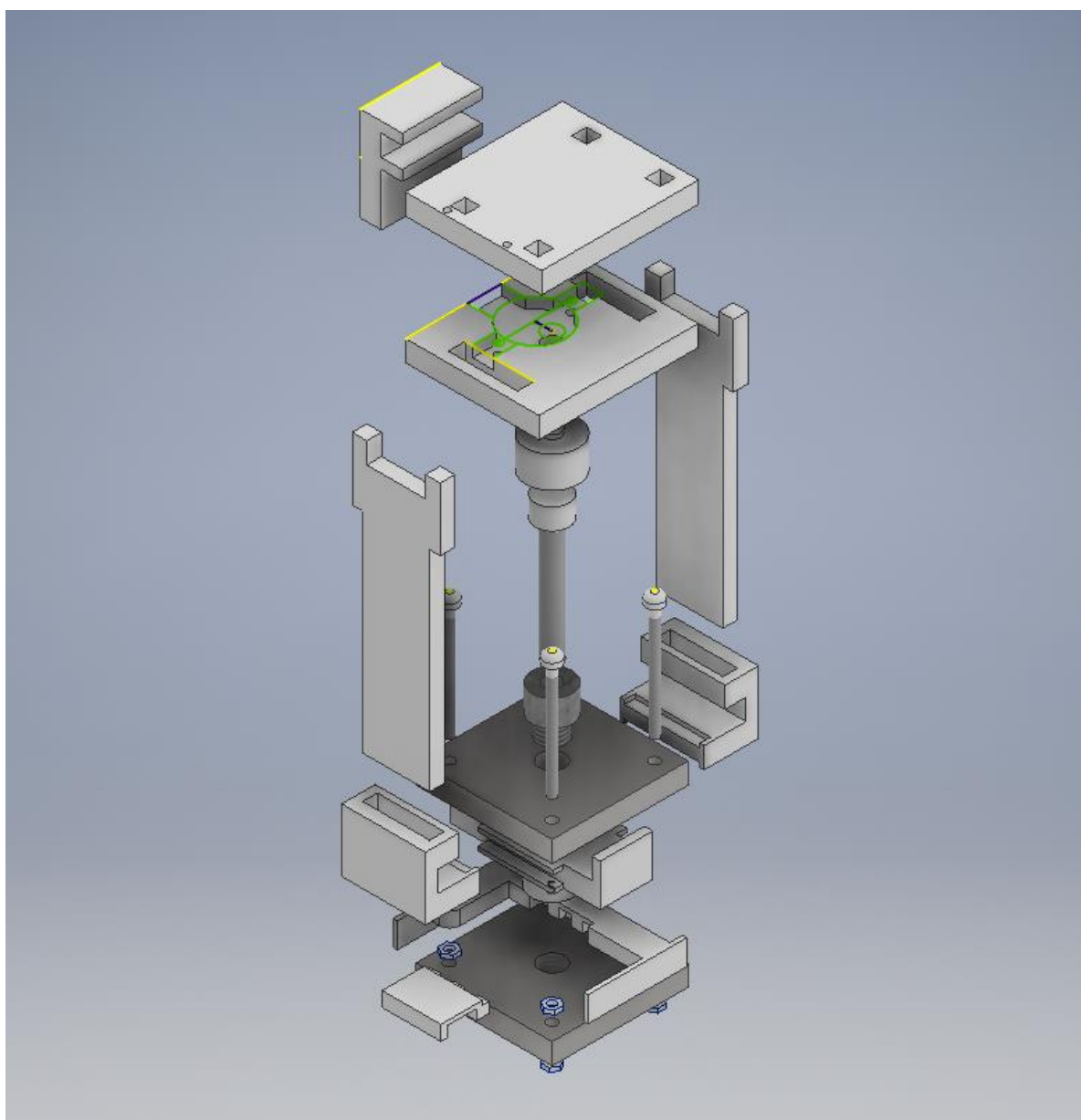
Para a execução destas etapas, priorizou-se a utilização de componentes de hardware livre e técnicas de fabricação acessíveis, como a impressão 3D e usinagem de alumínio, com o objetivo de desenvolver uma solução de baixo custo. As seções a seguir detalham as especificações dos materiais utilizados, os critérios de dimensionamento adotados e os procedimentos implementados para garantir a precisão micrométrica e a reprodutibilidade dos ensaios de flexão em três pontos.

3.1 CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA

O desenvolvimento da estrutura mecânica do protótipo fundamentou-se pela confecção de peças de peças metálicas e na modelagem computacional (CAD), seguida pela fabricação via manufatura aditiva (impressão 3D). Essa abordagem permitiu a criação de componentes com geometria otimizada, projetados especificamente para conferir alta rigidez estrutural e estabilidade dimensional ao sistema, como mostra o modelo da Figura 3. A arquitetura proposta assegura o alinhamento axial preciso durante a aplicação da carga, minimizando graus de liberdade indesejados e vibrações espúrias. No escopo deste equipamento, tais vibrações referem-se aos ruídos mecânicos inerentes ao acionamento discreto do motor de passo e a eventuais desalinhamentos muito pequenos no sistema de transmissão do fuso. A mitigação desse efeito é crítica, visto que qualquer trepidação estrutural seria capturada erroneamente pelo sistema óptico como um falso

deslocamento, corrompendo a leitura do algoritmo. Para complementar essa estabilidade, o berço de fixação foi configurado para garantir o apoio estático da amostra entre os dois pontos de sustentação, condição indispensável para a fidelidade metrológica e a repetibilidade dos ensaios de flexão. A figura a seguir mostra a projeção da estrutura mecânica desenvolvida.

Figura 3 – Primeiro conceito da estrutura mecânica.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O modelo do protótipo sofreu várias alterações, reajustes e adições em sua estrutura. Os componentes foram repensados para fazer melhor uso da impressora

3D do laboratório de pesquisa Núcleo de OptoSpintrônica (NOS), chegando ao modelo final para o desenvolvimento das peças.

Para a fabricação dos componentes estruturais de geometria complexa e elementos de acoplamento mecânico, optou-se pelo processo de manufatura aditiva baseada em resina (fotopolimerização em cuba). O equipamento selecionado para esta etapa foi a impressora 3D Anycubic Photon Mono X 6Ks.

Este modelo opera com a tecnologia MSLA (*Masked Stereolithography*). Segundo as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante (ANYCUBIC, 2023), este equipamento opera com uma matriz de luz UV paralela (*Matrix Light Source*) para curar camadas de resina líquida fotossensível. A principal justificativa técnica para a escolha deste equipamento reside em sua alta fidelidade dimensional, proporcionada por uma tela monocromática de 9,1 polegadas com resolução 6K (5760 x 3600 pixels). Tais especificações conferem ao sistema uma resolução horizontal (eixo XY) de aproximadamente 34 micrômetros ($34 \mu\text{m}$) e uma taxa de contraste de 380:1, garantindo arestas vivas e detalhamento micrométrico essenciais para os acoplamentos do sistema de transmissão de força.

A utilização de resinas fotopolimerizáveis exige a adoção de rigorosos protocolos de segurança, dado o potencial de toxicidade e irritabilidade dérmica do material em seu estado líquido. O processo de fabricação foi conduzido em ambiente com ventilação controlada, sendo mandatório o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), incluindo luvas nitrílicas, óculos de proteção e máscaras com filtros para vapores orgânicos.

Além da segurança, o manuseio correto da resina é determinante para as propriedades mecânicas finais da peça. Após a impressão, os componentes foram submetidos a um processo padronizado de pós-processamento, consistindo na lavagem em álcool isopropílico (para remoção do excesso de resina não curada) e pós-cura em câmara UV. Esse tratamento térmico e luminoso é vital para garantir que o polímero atinja seu grau máximo de reticulação, assegurando a rigidez e a resistência mecânica previstas no projeto dos suportes.

3.1.1 Materiais e Métodos

O desenvolvimento do projeto mecânico fundamentou-se na modelagem computacional tridimensional (CAD), realizada através do software Autodesk Inventor.

Esta etapa de prototipagem virtual permitiu o dimensionamento preciso de cada componente, assegurando a definição de tolerâncias adequadas para o acoplamento entre as partes e garantindo a rigidez estrutural necessária para a estabilidade das medições.

A validação prévia do conjunto (*assembly*) em ambiente virtual teve por objetivo antecipar potenciais interferências geométricas e planejar a logística de manufatura, otimizando o processo de fabricação no laboratório. Para a materialização do dispositivo, foram selecionados os seguintes materiais:

- **Parafuso micrométrico:** Aplicação precisa da força na amostra.
- **Motor de passo 28BYJ-48:** Controle do movimento do parafuso micrométrico.
- **Driver ULN2003:** Circuito de controle do motor de passo.
- **Microcontrolador Arduino:** Responsável pelo controle do motor e aquisição de dados.
- **Câmera microscópica digital:** Captura de imagens da flexão da amostra.
- **Amostras sensíveis:** Material a ser definido, de baixa espessura.
- **Peças metálicas:** Base do suporte do parafuso e hastes laterais do suporte do motor confeccionadas em alumínio para maior rigidez e precisão.

3.1.2 Componentes mecânicos

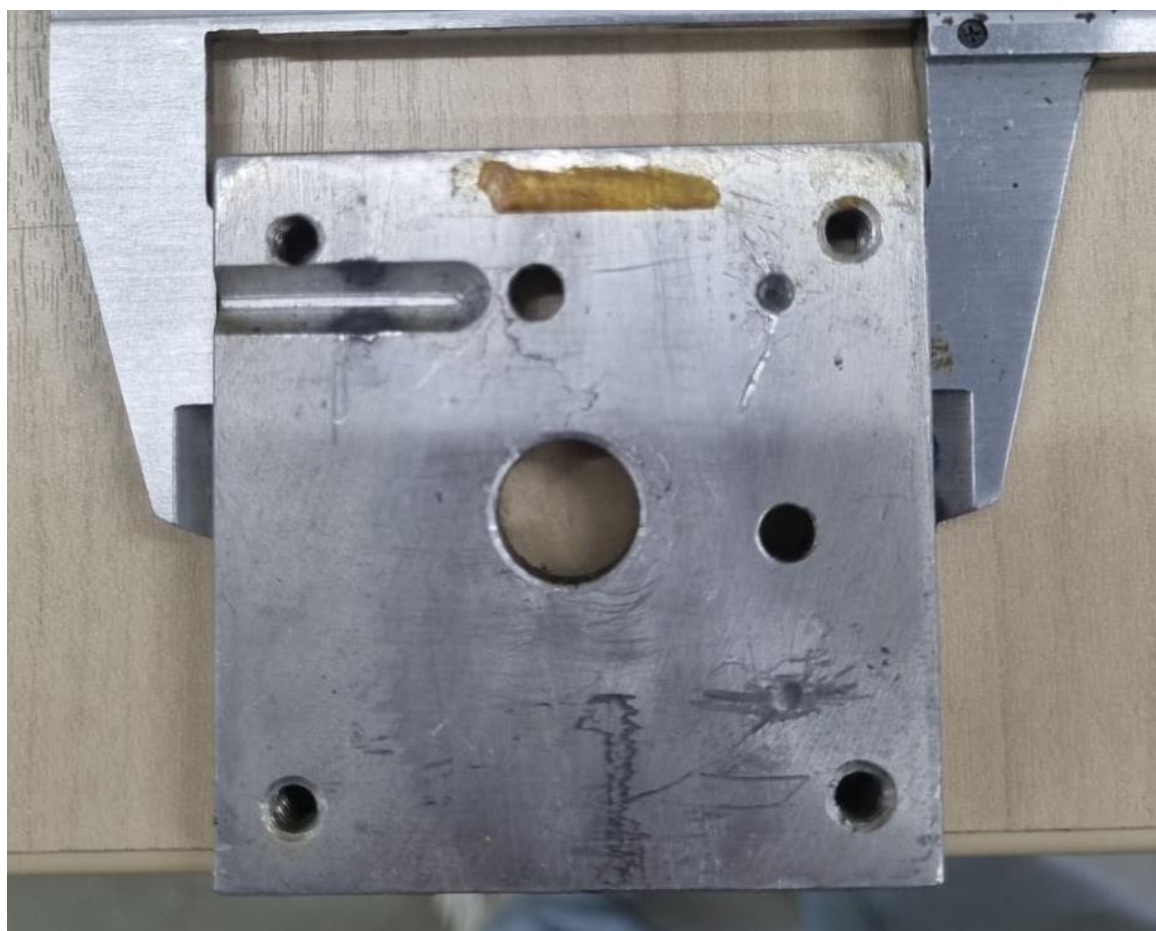
Uma vez definidos os parâmetros estruturais e as especificações de projeto abordados na seção anterior, partiu-se para a construção do dispositivo. Embora a manufatura aditiva tenha sido empregada para geometrias complexas, a base do sistema exigiu materiais de maior densidade.

Dentre os itens fabricados, destaca-se primeiramente a Estrutura Principal. A partir de uma chapa de alumínio, foram confeccionados dois componentes que atuam como chassi do equipamento, destinados a alojar os sensores e a placa de controle. Sua geometria retangular, com dimensões de 65 mm x 63,3 mm e espessura de 10

mm, foi projetada para otimizar o espaço interno e assegurar a rigidez mecânica necessária, mantendo a massa do conjunto em níveis adequados.

Esta base atua como pilar de sustentação para o parafuso micrométrico. Tal robustez estrutural é fundamental para mitigar vibrações suscetíveis de comprometer a precisão dos deslocamentos induzidos pelo motor, garantindo a reprodutibilidade experimental. A Figura 4 apresenta a chapa de alumínio confeccionada.

Figura 4 – Placa de alumínio confeccionada.



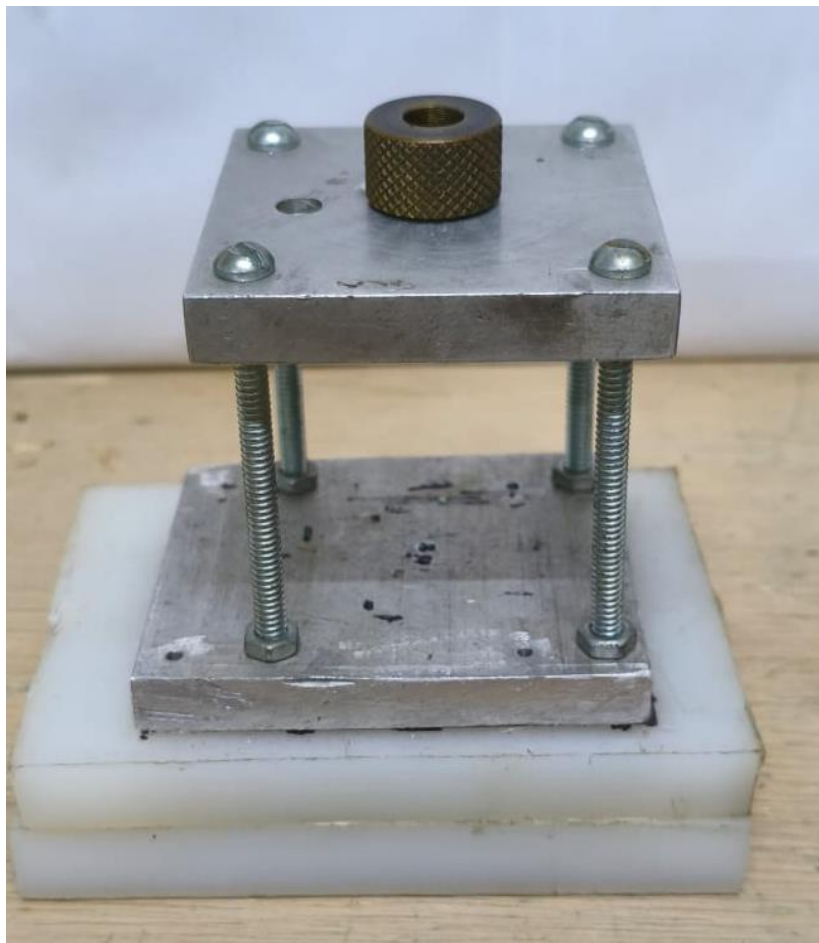
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As chapas de alumínio foram montadas em configuração paralela, mantendo um espaçamento vertical de 50 mm entre si e fixadas por parafusos em suas extremidades. Esta disposição confere solidez estrutural ao conjunto, permitindo o posicionamento correto da amostra e desobstruindo o campo de visão necessário para a câmera microscópica.

Adicionalmente, todo o conjunto metálico foi assentado sobre uma base de silicone, assegurando a estabilidade e a acomodação adequada sobre a superfície de

trabalho. Tal arranjo viabiliza o monitoramento visual da aplicação de tensão com elevada precisão, facilitando a análise do comportamento do material. A estrutura completa, denominada cabeçote fixo do medidor, é apresentada na Figura 5.

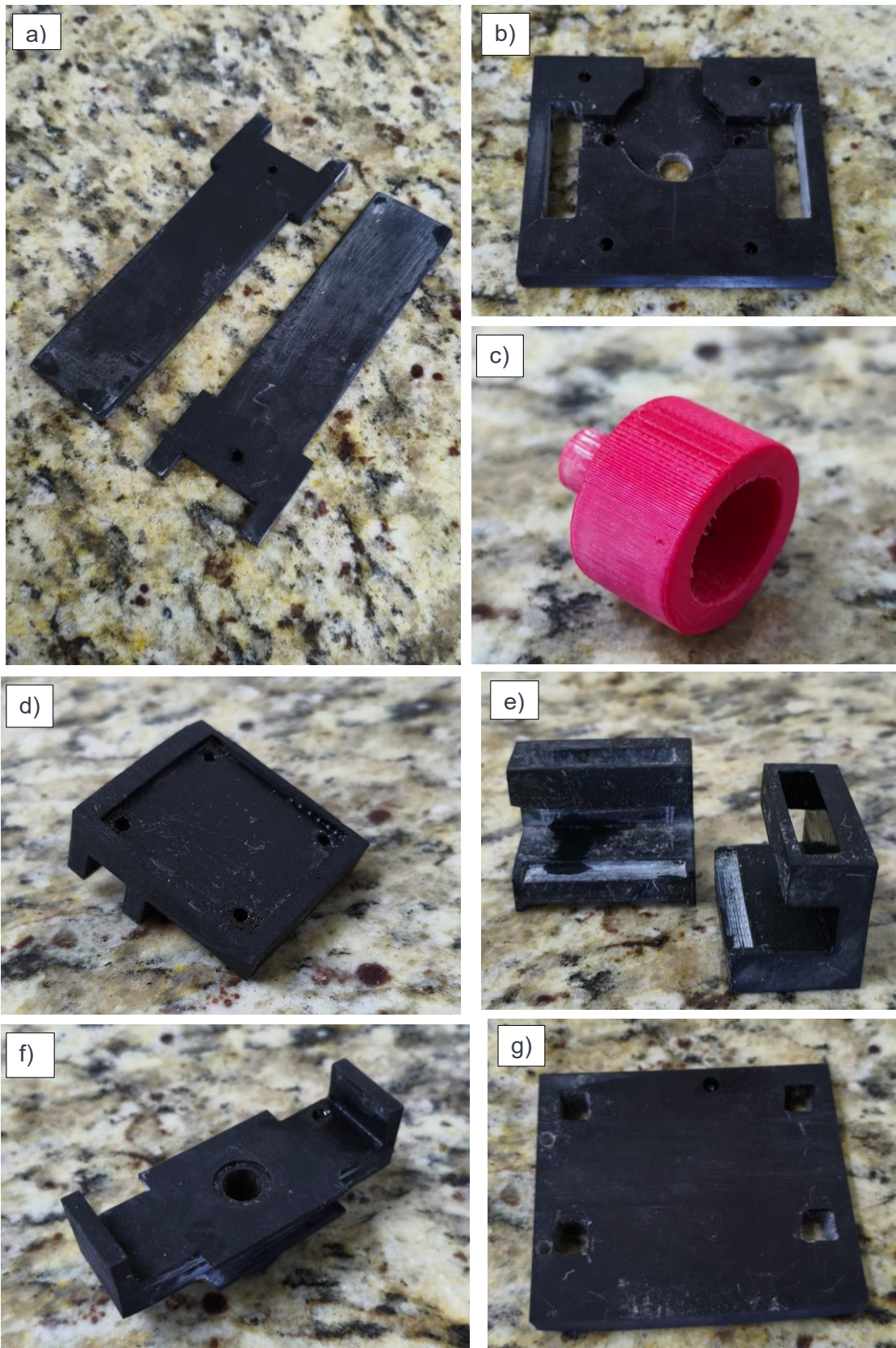
Figura 5 – Cabeçote fixo do medidor de tensões mecânicas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Complementando a estrutura metálica, a Figura 6 apresenta a compilação dos componentes mecânicos obtidos pelo processo de impressão 3D, já preparados para a etapa de montagem. Estes elementos foram projetados especificamente para acondicionar os componentes eletrônicos, posicionando-os superiormente ao cabeçote fixo.

Figura 6 – Componentes da estrutura mecânica impressos em 3D.



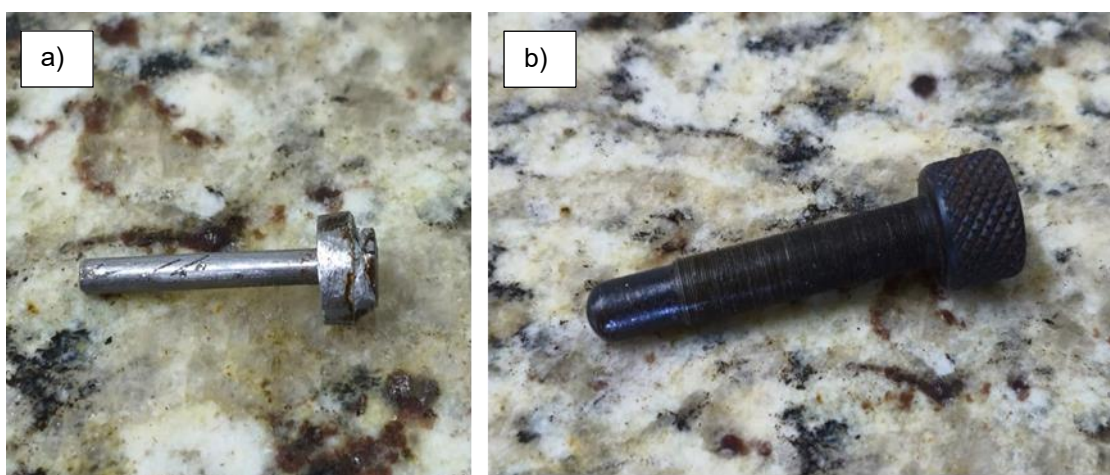
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Detalhando os componentes da Figura 6, observa-se em (a) as colunas-guia, elementos estruturais responsáveis por restringir o movimento do sistema à translação vertical. Elas sustentam o suporte do motor (b), peça que aloja o atuador de passo e assegura sua centralização. A transmissão de movimento é garantida pelo acoplamento rígido (c), desenhado para transferir o torque do motor para o parafuso micrométrico sem folgas mecânicas.

Na base do sistema, a fixação das colunas ao cabeçote metálico é realizada pelos suportes de eixo (e), os quais trabalham em conjunto com o acoplamento do atuador (f) para garantir o alinhamento perpendicular da estrutura. Por fim, completam o conjunto os suportes para a eletrônica embarcada, sendo a peça (d) destinada ao Driver ULN2003 e a peça (g) ao Arduino, facilitando a integração elétrica do protótipo.

Para a aplicação direta da carga, o sistema utiliza um conjunto de atuação detalhado na Figura 7. No interior do acoplamento do atuador, localiza-se o punção (a). Este componente consiste em um elemento metálico de ponta cônica (adaptado de um prego comercial), selecionado para concentrar a tensão em uma área reduzida da amostra. O avanço vertical deste punção é governado pelo parafuso micrométrico (b), que converte a rotação do motor em deslocamento linear preciso, o parafuso micrométrico pressiona diretamente o punção (a), para minimizar o atrito foi aplicado óleo lubrificante no contato das peças.

Figura 7 – Dispositivo de punção.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No que tange ao posicionamento e suporte do corpo de prova, desenvolveu-se um componente específico denominado gabarito de ensaio. Este dispositivo é

constituído fundamentalmente por uma base usinada em alumínio, com dimensões externas de 40 mm (comprimento) x 11 mm (largura) x 22 mm (altura). Uma característica crítica de sua geometria é o vão livre de 45 mm entre os pontos de apoio, dimensionado para permitir a correta aplicação de carga no centro da amostra.

Integrado à estrutura metálica, acoplou-se um adaptador fabricado por impressão 3D, projetado para conectar o gabarito à interface de fixação do equipamento. A concepção modular deste conjunto permite que o gabarito seja totalmente removível. Essa característica não apenas facilita a ergonomia durante a troca e o manuseio dos corpos de prova, mas também assegura o travamento mecânico da amostra, garantindo a estabilidade e a repetibilidade necessárias aos ensaios. A configuração final do gabarito de ensaio é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Gabarito de ensaio.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Com a integração do gabarito de ensaio à estrutura principal, conclui-se a etapa de desenvolvimento e fabricação mecânica do protótipo. A abordagem híbrida adotada, combinando a robustez das bases de alumínio com a versatilidade e

precisão da manufatura aditiva, resultou em um conjunto estruturalmente rígido e funcional.

3.1.3 Instalação do Parafuso Micrométrico

O parafuso micrométrico, elemento central para a precisão do sistema, foi adaptado de um instrumento de metrologia de alta fidelidade e integrado rigidamente à base de alumínio. Sua função primordial é converter o movimento rotacional do atuador em deslocamento linear, permitindo a aplicação controlada de deformação na amostra. Tal característica é indispensável para a realização de ensaios mecânicos em materiais sensíveis ou de espessura reduzida.

A análise cinemática do conjunto determinou que o parafuso apresenta um avanço linear de 0,37 mm por revolução. Considerando a configuração do motor de passo utilizado, que oferece uma resolução de 2048 passos por volta, obtém-se uma resolução teórica de aproximadamente $0,18 \mu\text{m}$ (0,00018 mm) por passo. Esta magnitude sub-micrométrica assegura que mesmo pequenas rotações resultem em variações infinitesimais na carga aplicada, garantindo o rigor necessário aos experimentos.

Ademais, a mecanização deste componente elimina a necessidade de ajustes manuais complexos, simplificando o projeto sem detrimento da confiabilidade. A integração entre o parafuso micrométrico, o motor de passo e o controle via Arduino possibilita a automação completa dos deslocamentos, elevando significativamente a precisão e a reprodutibilidade dos dados obtidos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA MOLA DE RETORNO E ANÁLISE DE CARGA

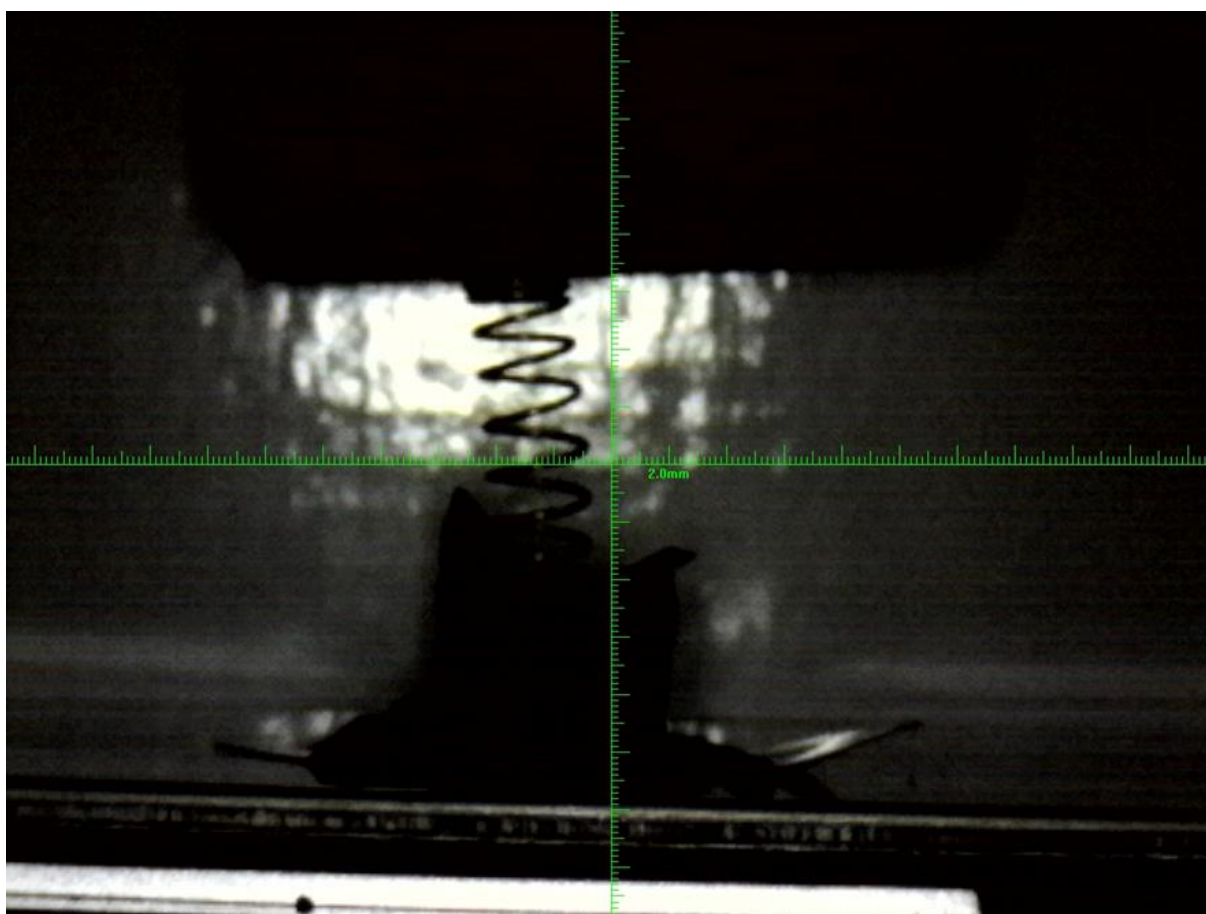
A arquitetura do dispositivo utiliza uma mola helicoidal de compressão com a função primária de garantir o retorno automático do punção e eliminar folgas mecânicas no acoplamento do fuso. Contudo, durante a fase de aplicação de carga (descida), a compressão desta mola gera uma força resistiva que se opõe ao movimento do motor.

Portanto, a determinação experimental da constante elástica (K) deste componente não tem o objetivo de atuar como célula de carga para a amostra, mas sim de quantificar a Carga Parasita do Sistema. Conhecendo-se a rigidez da mola,

torna-se possível calcular, em tempo real, qual parcela do torque do motor está sendo consumida apenas para vencer a resistência do mecanismo. Este dado é fundamental para definir o Envelope Operacional do equipamento, assegurando que a força necessária para deformar a amostra somada à força para comprimir a mola não exceda o torque máximo do motor de passo, prevenindo a perda de sincronismo durante os ensaios.

O procedimento de calibração foi realizado através de um ensaio estático gravimétrico. A mola foi submetida a diferentes cargas, tendo seu deslocamento resultante mensurado para cada incremento, medido utilizando o software de comando do microscópio digital (*HiView*), apresentado na Figura 9. Para a determinação da Força atuante em cada ponto de medição, realizou-se a conversão da massa aplicada em Força Peso. Este cálculo foi efetuado multiplicando-se a massa pela aceleração da gravidade, adotando-se o valor de referência de $9,81 \text{ m/s}^2$.

Figura 9 – Procedimento de calibração da resistência da mola.

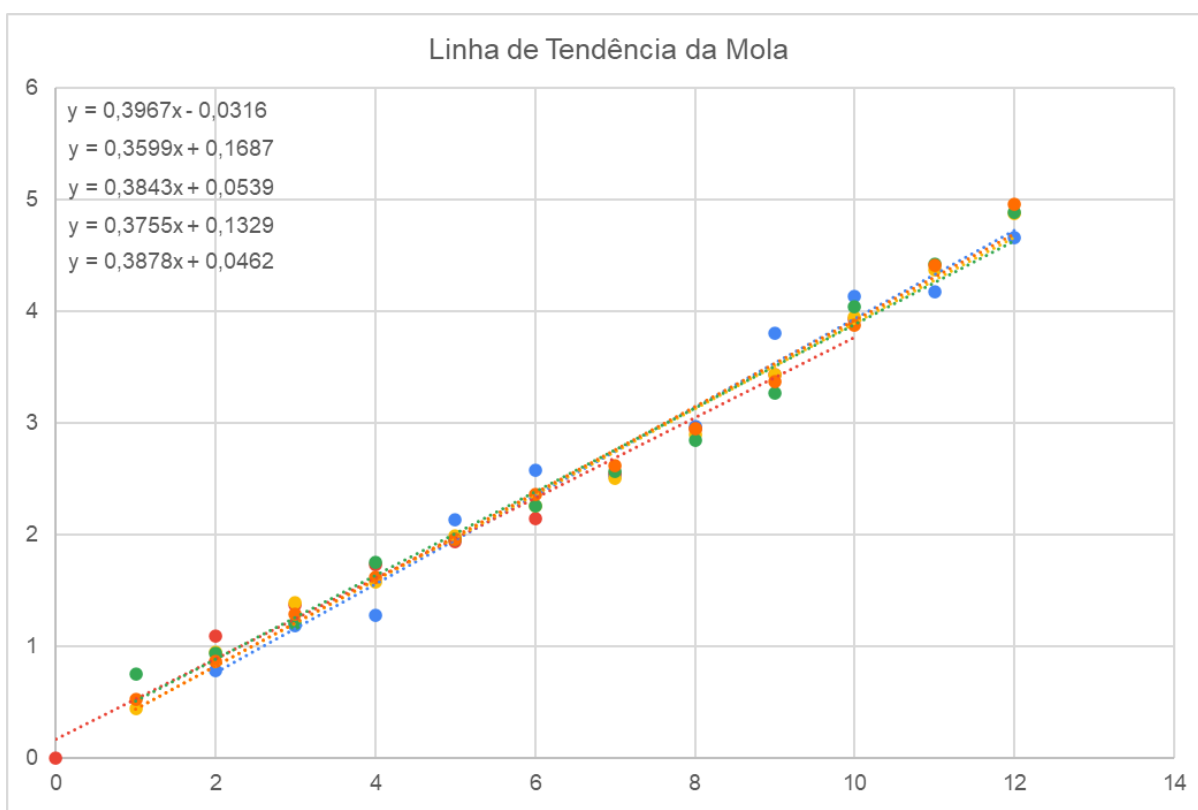


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os dados coletados, relacionando a massa, a força calculada (em Newtons) e a deformação observada (em mm), formatados em tabelas conforme pode ser visto no Apêndice A.

Visando garantir a confiabilidade estatística do parâmetro K e mitigar erros de leitura ou variações no assentamento do material, o procedimento experimental foi repetido em cinco séries de medições. Os dados coletados foram compilados para gerar uma curva característica média do comportamento do componente, a Figura 10 apresenta a curva de tendência da mola para as 5 amostragens, visualizadas em um único gráfico, e a função linear vista no canto superior mostra a constante de mola sendo o valor que acompanha a deformação.

Figura 10 – Linhas de tendência das 5 séries de medição para determinação da rigidez média.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A análise dos dados brutos revelou que, para deformações iniciais muito pequenas (entre 0 e 5 mm), os valores de K apresentavam oscilações atípicas. Esse comportamento foi atribuído à acomodação mecânica inicial dos elos da mola e à incerteza relativa da medição visual nessas escalas reduzidas.

Para a adotar um valor final adequado de sua constante, optou-se por desconsiderar essa região inicial de instabilidade. Foi gerado um gráfico de dispersão com linha de tendência linear considerando apenas o regime estabilizado das 5 medições. O coeficiente angular da reta (que representa a rigidez K) obtido pela regressão linear dos dados estáveis resultou em um valor médio de aproximadamente 0,396 N/mm.

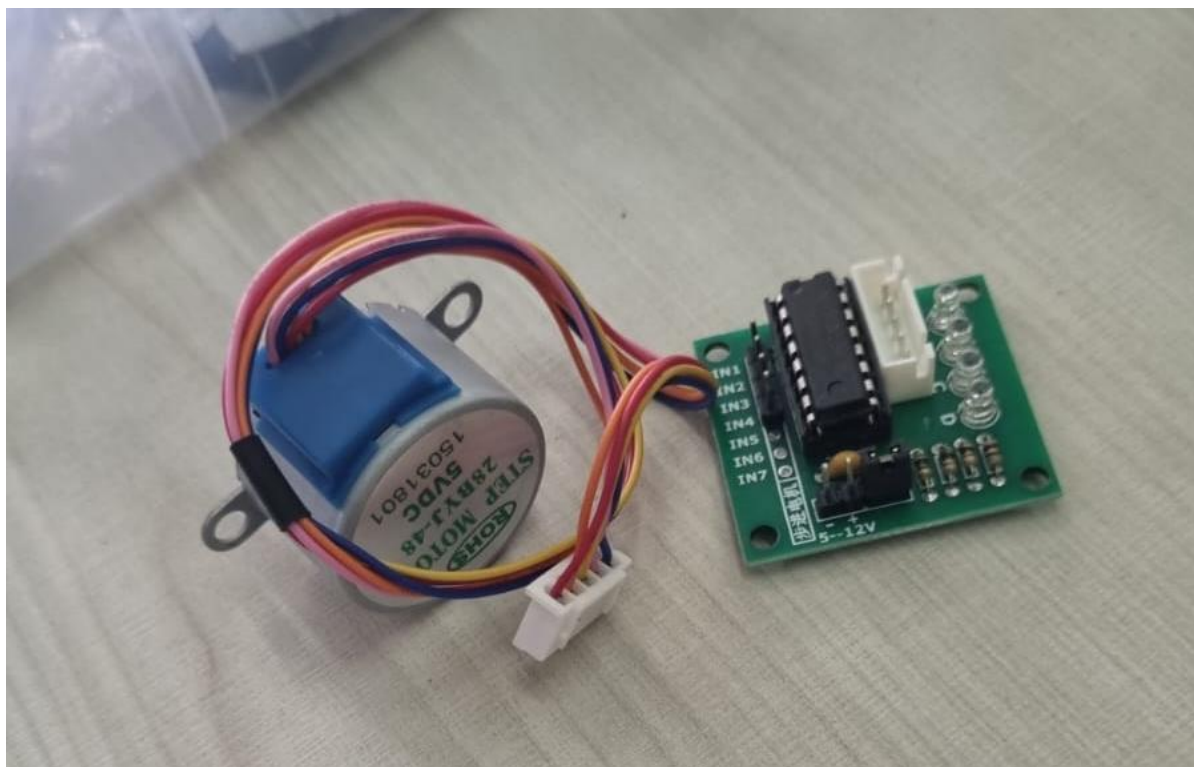
Sendo assim, para fins de implementação no algoritmo de controle do software e para facilitar as rotinas de cálculo computacional, adotou-se o arredondamento deste valor médio para $K = 0,40$ N/mm. Este ajuste simplifica a constante sem comprometer a precisão do sistema, visto que a diferença percentual é situada dentro da margem de erro experimental aceitável para o protótipo.

3.3 INTEGRAÇÃO DO MOTOR DE PASSO

Para o acionamento automatizado do dispositivo, selecionou-se o motor de passo modelo 28BYJ-48. A escolha deste atuador justifica-se principalmente pela presença de uma caixa de redução interna, característica que, embora reduza a velocidade final, eleva significativamente o torque disponível e refina a resolução angular do sistema, já detalhado anteriormente. Tal propriedade é vital para vencer a inércia do parafuso micrométrico e garantir movimentos suaves e controlados.

A integração mecânica foi concretizada através da fixação do motor ao suporte rígido do carro móvel (previamente detalhado), o qual desliza sobre as colunas guia. Esta montagem solidária foi projetada para assegurar o alinhamento coaxial perfeito entre o eixo do motor e o parafuso de carga, prevenindo vibrações espúrias ou o travamento do mecanismo durante os ensaios. O motor utilizado na montagem pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 – Motor de passo 28BYJ-48.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Do ponto de vista eletromecânico, o atuador selecionado opera com arquitetura unipolar de 5 fios. Diferente de motores DC convencionais, seu controle é realizado através de uma sequência discreta de pulsos elétricos enviados pelo microcontrolador, onde cada pulso resulta em um incremento angular fixo. Esta característica digital é o que confere a repetibilidade necessária ao sistema. As principais especificações técnicas consideradas para o projeto incluem:

- **Resolução Angular:** O motor oferece 2048 passos por revolução completa do eixo de saída. Este valor elevado é resultado da combinação entre o passo do estator e a relação de transmissão do conjunto de engrenagens internas.
- **Eficiência Energética:** O componente apresenta baixo consumo de corrente, permitindo sua alimentação direta através das portas de 5V do microcontrolador ou de fontes de baixa potência, simplificando a arquitetura elétrica.
- **Torque de Retenção:** Apesar de suas dimensões reduzidas, o sistema de redução multiplica o torque de saída, tornando-o apto para vencer a resistência do parafuso micrométrico em aplicações de precisão.

Quanto à integração mecânica, optou-se por uma topologia de 'acionamento direto flutuante'. Nesta configuração, o suporte do motor (carro móvel) translada solidariamente ao avanço do parafuso micrométrico. Esta estratégia de design elimina a necessidade de eixos cardã ou trens de engrenagens externos complexos, reduzindo drasticamente as folgas mecânicas (*backlash*) e o peso total do conjunto móvel.

Em contrapartida, a unidade de controle (Arduino) e o driver de potência foram fixados estaticamente na parte superior da estrutura. O isolamento físico entre a eletrônica de controle (estática) e o atuador (móvel) favorece a organização do cabeamento e protege os circuitos contra vibrações harmônicas geradas durante a operação do motor, que acarreta na mal conexão dos cabos entre o motor e o Arduino, assegurando a integridade do sinal e a estabilidade da medição.

3.3.1 Comunicação com Arduino

A gestão do sistema de atuação eletromecânica é centralizada no microcontrolador Arduino, que opera como a unidade de processamento lógico do protótipo. Sua função primária consiste em atuar como uma interface de hardware, traduzindo as instruções de alto nível enviadas pelo computador em sequências complexas de excitação de fases, indispensáveis para o funcionamento do motor de passo 28BYJ-48.

A utilização deste microcontrolador justifica-se pela incapacidade de computadores convencionais fornecerem diretamente a corrente e o sequenciamento de pulsos exigidos pelo atuador. Desta forma, o firmware embarcado foi desenvolvido para modular parâmetros críticos do ensaio, tais como:

- **Resolução de Passo:** Definição da granularidade do movimento, assegurando a precisão micrométrica do avanço.
- **Velocidade Angular:** Controle da taxa de frequência dos pulsos (RPM), determinando a velocidade de aplicação da carga.
- **Controle Direcional:** Gerenciamento da inversão de fases para alternar entre o sentido horário (avanço/compressão) e anti-horário (retorno/alívio).

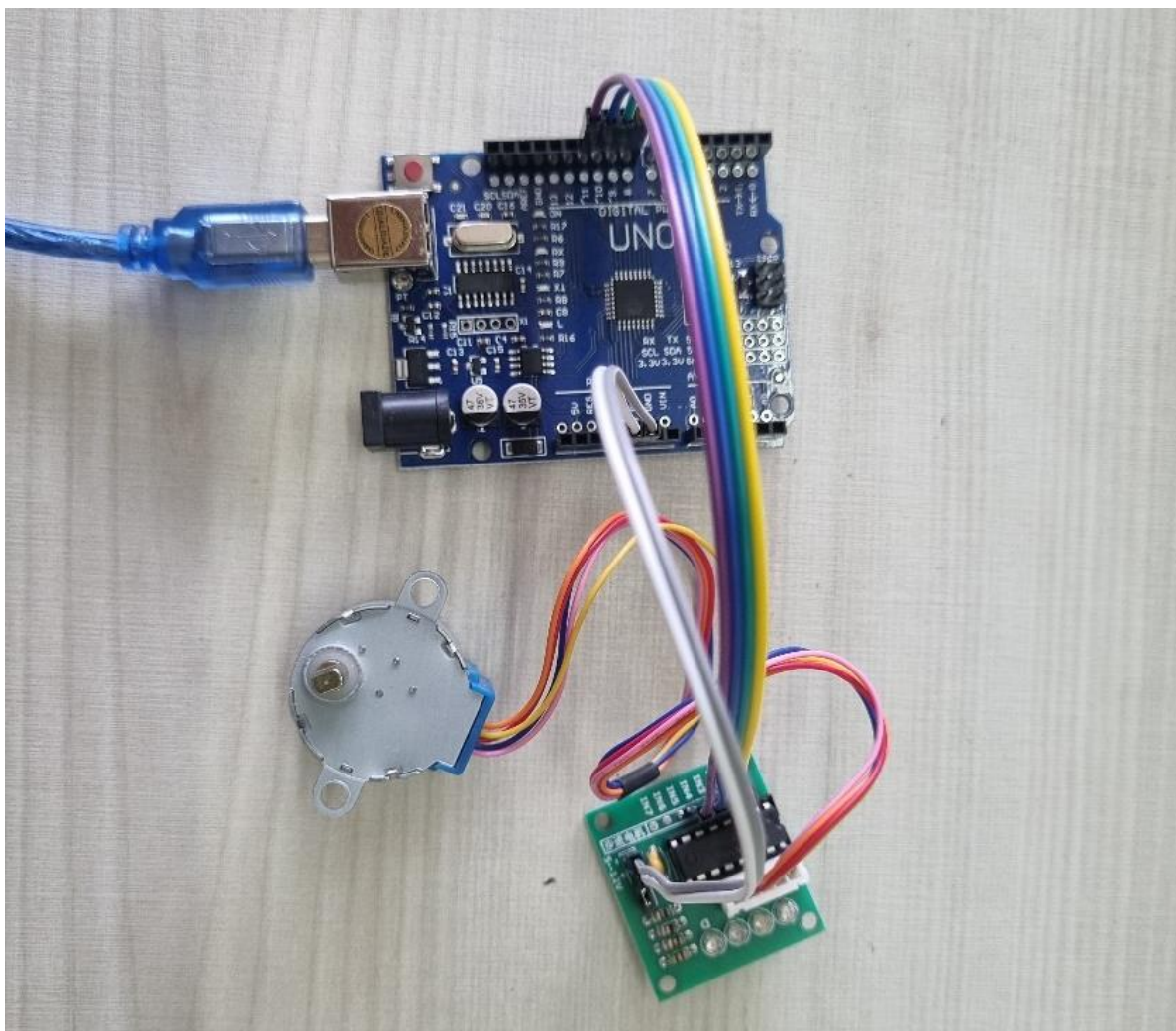
Além da atuação física, o microcontrolador estabelece um canal de comunicação serial (UART) bidirecional. Esta arquitetura permite não apenas a recepção de comandos em tempo real, mas também prepara o sistema para futuras implementações de feedback de posição (malha fechada). A automação proporcionada por este arranjo elimina a variabilidade inerente à operação manual, resultando em um sistema robusto, capaz de executar rotinas de teste com elevada repetibilidade e rigor científico.

3.3.2 Montagem do Sistema Eletrônico

A arquitetura eletrônica foi executada seguindo a topologia de conexões apresentada no diagrama esquemático. O acoplamento entre a unidade de processamento e o atuador é mediado pelo módulo driver ULN2003, um *array* de transistores Darlington essencial para a amplificação de corrente, como já detalhado na fundamentação teórica. Para tal, as quatro entradas de sinal do driver (IN1 a IN4) foram conectadas individualmente às portas digitais do Arduino (GPIO), estabelecendo o barramento de controle lógico.

No que tange ao fornecimento de energia, implementou-se uma estratégia de alimentação dedicada: uma fonte externa de 5V DC foi alocada para o circuito de potência do motor, garantindo estabilidade e prevenindo sobrecargas na porta USB do computador. A interface de dados, por sua vez, ocorre via conexão serial (USB), meio pelo qual o *firmware* desenvolvido em linguagem C++ foi carregado no microcontrolador. Este código é responsável por orquestrar a sequência de pulsos e a velocidade de operação. A disposição física e as interconexões resultantes desta montagem são ilustradas na Figura 12.

Figura 12 – Integração do motor de passo com o Arduino.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.3 Comando do Motor de Passo

O desenvolvimento do *firmware* de controle foi realizado no Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) do Arduino, utilizando a linguagem C++. A escolha desta linguagem justifica-se pela sua eficiência na manipulação de *hardware* de baixo nível e pela robustez no gerenciamento de tempo real, requisitos indispensáveis para a sincronização entre o avanço do parafuso micrométrico e a captura de dados.

Para otimizar o desenvolvimento, utilizou-se a biblioteca nativa Stepper.h, que abstrai a complexidade do chaveamento das fases do motor, permitindo focar na lógica de movimentação. Uma vez compilado e carregado, o código reside na

memória não-volátil (Flash) do microcontrolador, assegurando a autonomia operacional do sistema.

A estrutura lógica implementada no Arduino abrange as seguintes etapas funcionais:

- **Mapeamento de Hardware:** Definição e configuração das portas digitais (GPIOs) responsáveis pela interface com o driver do motor 28BYJ-48.
- **Instanciação do Controle:** Utilização das funções da biblioteca `Stepper.h` para criar o objeto de controle do motor.
- **Parametrização Cinemática:** Definição das variáveis de velocidade (em RPM) e resolução (passos por volta), calibrando o software com as características mecânicas do parafuso.
- **Interface de Comunicação:** Implementação de um protocolo de escuta na porta Serial (UART), habilitando o microcontrolador a receber comandos externos processados pelo *script* em Python.

3.4 DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO E INTERFACE GRÁFICA

A automação e o controle do protótipo são executados em uma aplicação para desktop. O código desenvolvido em Python é responsável pela comunicação entre o usuário e o Arduino, facilitando o controle de hardware pelo usuário e aproveitando as capacidades avançadas do Python em processamento de dados e interface gráfica. A comunicação entre o computador e o microcontrolador foi realizada via protocolo serial (USB-UART). Foi possível definir um protocolo de comunicação simples, onde a aplicação Python envia strings de comando, como por exemplo "H:100" (girar 100 passos no sentido horário) ou "A:50" (girar 50 passos no sentido anti-horário) que são enviados diretamente para o sistema do Arduino. O firmware no Arduino é responsável por interpretar esses comandos e traduzi-los em sequências de pulsos elétricos para o driver do motor de passo.

Com o código Python estabelecido e se conectando com o serial da placa Arduino os comandos são enviados no formato correto para controlar o motor. Dessa forma, a rotação do motor foi ajustada conforme a entrada do usuário, permitindo a movimentação controlada do parafuso micrométrico. Além disso, o código Python foi responsável por sincronizar a captura de imagens da câmera microscópica com os

deslocamentos do motor. Isso permitirá uma análise detalhada da tensão mecânica aplicada à amostra sensível em diferentes condições de carga.

3.4.1 Arquitetura do Software e Bibliotecas Usadas

O desenvolvimento do software de controle e aquisição de dados foi realizado em linguagem Python, que possui facilidade de operação por ter a capacidade de implementar bibliotecas que simplifica as linhas de código. Sua codificação foi escrita adotando uma arquitetura modular. O código integra diferentes pacotes para gerenciar a interface gráfica, a comunicação com o hardware e o processamento de imagens de forma simultânea. As ferramentas utilizadas foram divididas entre bibliotecas de externas, onde a própria IDE (*Integrated Development Environment*) permite instalar tais bibliotecas e usar módulos nativos da linguagem:

Bibliotecas Externas:

- **PySerial:** Gerencia a comunicação serial (USB-UART) entre o computador e o microcontrolador Arduino. É responsável pelo envio das *strings* de comando ao motor de passo e pela recepção dos dados dos sensores em tempo real.
- **NumPy:** Base para o processamento numérico. As conversões de unidades (passos do atuador para milímetros) e a manipulação dos vetores de força e deslocamento foram implementadas usando matrizes bidimensionais, otimizando o custo computacional do ensaio.
- **Matplotlib:** Empregada para a geração gráfica. Permite a plotagem dinâmica da curva de Tensão x Deformação na interface, fornecendo *feedback* visual imediato do comportamento do material.
- **OpenCV:** Núcleo do sistema de extensometria óptica. Processa o fluxo de vídeo do microscópio digital, aplicando filtros de suavização (*Gaussian Blur*) para atenuação de ruídos e utilizando o algoritmo de *Template Matching* para rastrear a deflexão da amostra a cada *frame*.
- **Pillow (PIL):** Atua como ponte gráfica entre a visão computacional e a interface. Como o OpenCV processa os *frames* em matrizes de cores BGR

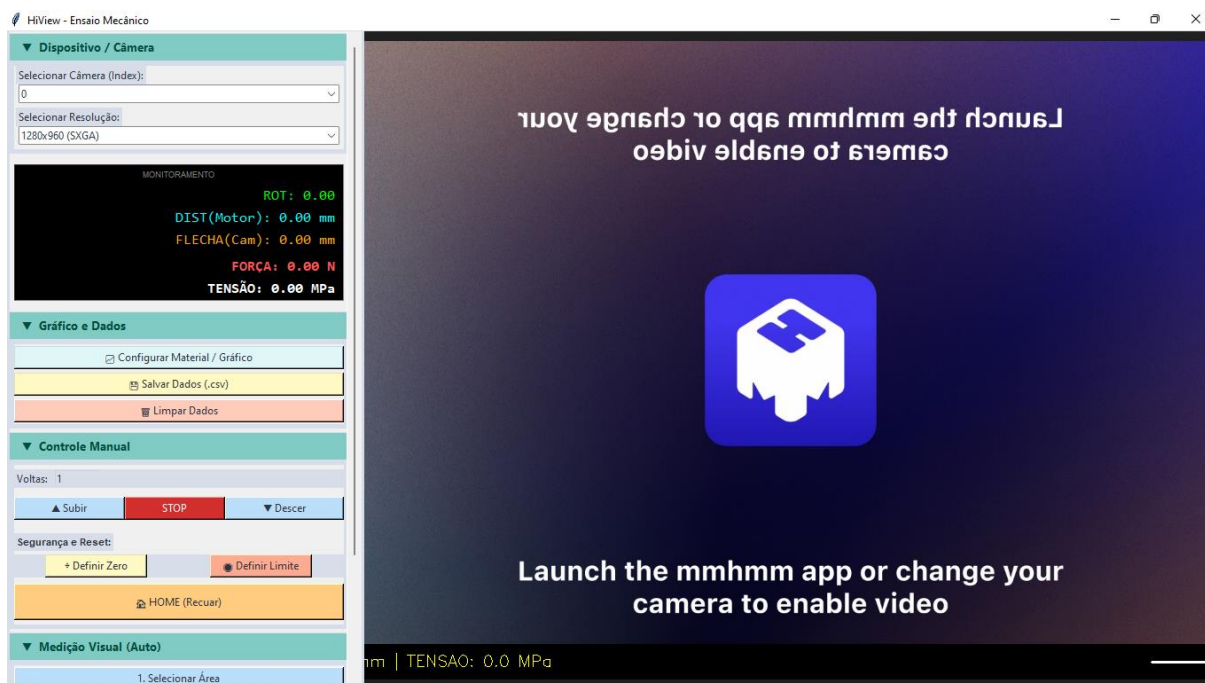
e o Tkinter exige formatos de imagem específicos, o Pillow converte esses *arrays* em objetos *PhotoImage* para exibição do vídeo em tempo real.

Módulos Nativos (*Standard Library*):

- **Tkinter e ttk:** Módulos padrão para a construção da Interface Gráfica do Usuário (GUI). O Tkinter estrutura as janelas principais, enquanto o submódulo *ttk* (*Themed Tkinter*) fornece componentes dinâmicos, como as tabelas de dados (*Treeview*) e os menus de seleção (*Combobox*).
- **csv:** Módulo de formatação utilizado para organizar e exportar os dados brutos (tempo, tensão, deformação e força). Ao final do experimento, ele compila essas matrizes e salva o registro físico em um arquivo de extensão *.csv* (*Comma-Separated Values*), viabilizando o pós-processamento em planilhas eletrônicas.
- **threading:** Módulo de concorrência que permite a execução paralela das tarefas. Ele isola o laço de captura de vídeo e a comunicação serial em *threads* secundárias. Isso impede que o processamento pesado congele a interface gráfica, mantendo a operação fluida enquanto aguarda respostas do *hardware*.
- **json:** Módulo de serialização usado para salvar os parâmetros de calibração e os limites operacionais do atuador em arquivos locais (*.json*). Isso garante que o sistema retenha na memória a configuração do último ensaio, agilizando a preparação (*setup*).

A integração dessas ferramentas, em especial a arquitetura de *multithreading*, viabilizou um sistema capaz de ler o *hardware*, processar imagens e plotar gráficos simultaneamente sem comprometer a estabilidade do programa, conforme ilustra o diagrama de arquitetura do sistema na Figura 13.

Figura 13 – Aplicativo de controle.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A aplicação desenvolvida para a operação do dispositivo consiste em uma Interface Gráfica do Usuário (GUI), projetada para otimizar a interação homem-máquina e garantir a precisão na execução dos ensaios, os comandos são descritos de forma objetiva, e suas funções permitem fácil configuração, permitindo selecionar a resolução e entrada da câmera, também dá acesso para que o usuário configure o sistema por meio de funções de calibração e ajustes. O painel principal apresenta um sistema de monitoramento e telemetria avançado, exibindo quatro grandezas físicas fundamentais correlacionadas em tempo real:

1. **Deslocamento Mecânico:** Posição teórica do atuador baseada na contagem de passos do motor multiplicada pelo passo do fuso.
2. **Deflexão Visual (Flecha):** Medida empiricamente pela câmera através do algoritmo de rastreamento, independente das folgas mecânicas.
3. **Capacidade de Força Restante (N):** Um indicador de segurança que exibe o saldo de torque disponível no motor ($F_{max} - F_{mola}$), alertando o operador caso a resistência do sistema se aproxime do limite de travamento do atuador.
4. **Tensão Teórica (MPa):** Calculada dinamicamente através da Lei de Hooke Constitutiva conforme a equação (3), utilizando a deformação medida

visualmente e o Módulo de Elasticidade (E) do material inserido pelo usuário como parâmetro de entrada.

Permite comparar instantaneamente se a deformação real da amostra segue o comportamento elástico previsto.

A interface gráfica foi estruturada em blocos funcionais para facilitar a operação do equipamento e o monitoramento simultâneo do ensaio. As funcionalidades estão divididas nas seguintes seções:

- **Configurações de Dispositivo e Vídeo:** Gerencia a comunicação de *hardware*. Permite selecionar o índice da porta USB da câmera e ajustar a resolução da captura de vídeo, adequando a carga de processamento de imagem à capacidade do computador.
- **Tabela de Dados em Tempo Real:** Utiliza um componente tabular (*Treeview*) para registrar, a cada iteração do *loop* principal, os valores instantâneos de Força (N), Flecha (mm), Tensão (MPa) e Deformação. Essa exibição permite ao operador monitorar a estabilidade numérica enquanto o ensaio ocorre.
- **Análise Gráfica e Propriedades da Amostra:** Gera a curva de Força x Deslocamento ou Tensão x Deformação em tempo real via Matplotlib. Neste bloco, o usuário insere a geometria do corpo de prova (retangular ou circular, com suas respectivas dimensões) e seleciona o tipo de ensaio (Flexão em 3 Pontos ou Punção). Com essas entradas de *setup*, o algoritmo aplica as equações geométricas da mecânica dos sólidos para processar os dados brutos.
- **Controle Manual e Automação:** Agrupa os comandos do atuador central. O operador pode avançar ou recuar o motor de passo definindo o número de voltas desejadas. O painel inclui um botão de parada de emergência (*Stop*), a função de zeramento (*Homing*), que zera os contadores de passo e as variáveis físicas para estabelecer o referencial inicial e final de teste.
- **Rastreamento Óptico de Deslocamento:** Controla o algoritmo de visão computacional. O usuário seleciona uma Região de Interesse (ROI) diretamente no *feed* de vídeo. A partir dessa marcação, o código aplica filtros gaussianos e utiliza a técnica de *Template Matching* para rastrear o deslocamento vertical em *pixels* a cada *frame*. Essa técnica permite medir a

flecha real do corpo de prova, eliminando erros causados pela complacência da estrutura mecânica.

- **Calibração e Metrologia:** Converte o deslocamento óptico em dimensões físicas. O usuário informa uma medida de referência conhecida (em milímetros) e o *software* calcula o fator de escala (razão px/mm). O módulo também projeta uma régua virtual graduada sobre o vídeo, auxiliando na verificação visual do teste.
- **Exportação de Dados:** Responsável por documentar os resultados. O sistema grava o vídeo do ensaio com a superposição das variáveis de leitura (*overlay*) e, ao final da rotina, exporta as matrizes numéricas (tempo, força, tensão e deslocamento) diretamente para um arquivo estruturado de formato .csv.
- **Processamento de Imagem:** Oferece filtros em tempo real, como espelhamento, inversão de cores e binarização. Essas ferramentas ajustam o contraste da amostra, facilitando o reconhecimento do padrão pelo algoritmo em condições de iluminação desfavoráveis.

O *layout* visual da interface foi projetado com inspiração no *software* comercial HiView para facilitar a curva de aprendizado do operador. A diferença estrutural da arquitetura desenvolvida, no entanto, é a unificação da malha de controle: a captura de vídeo, a aquisição de dados físicos e o acionamento do motor operam de forma integrada na mesma aplicação, uma flexibilidade não permitida por plataformas de código fechado.

Para garantir a transparência metodológica e permitir a reprodutibilidade deste projeto por outros pesquisadores, o código-fonte integral desenvolvido em Python para a interface gráfica, bem como o *firmware* estruturado para o microcontrolador Arduino, foram disponibilizados em um repositório digital de acesso aberto. Todo o versionamento do *software* e os arquivos complementares podem ser consultados na plataforma GitHub através do link: <https://github.com/araujonetooff/medidor-de-tensao>

3.5 SISTEMA DE ANÁLISE ÓPTICA E CALIBRAÇÃO

A mensuração precisa da deflexão da amostra constitui o núcleo da análise mecânica proposta. Para viabilizar a aquisição de dados visuais com a resolução necessária, o sistema incorpora um microscópio digital com interface USB e

capacidade de magnificação de 1600x, o qual atua como o transdutor óptico do equipamento.

Contudo, a confiabilidade dos dados obtidos depende intrinsecamente da calibração do sistema. Este procedimento é considerado a etapa mais crítica para a validação metrológica, pois é responsável por determinar o fator de escala. É através deste parâmetro que se estabelece a correlação matemática entre as unidades discretas da imagem (pixels) e as dimensões físicas reais (micrômetros), permitindo a quantificação exata dos deslocamentos observados.

A garantia da confiabilidade metrológica do protótipo depende intrinsecamente de um processo rigoroso de calibração, o qual foi dividido em duas etapas fundamentais: a calibração cinemática do atuador e a calibração dimensional do sistema óptico.

3.5.1 Calibração Cinemática e Limites de Curso

A primeira etapa consiste na definição do sistema de coordenadas de operação. Na interface gráfica desenvolvida, implementou-se um módulo dedicado à configuração dos limites físicos de movimentação. Através da função "Definir Zero" (Set Zero), o operador estabelece a origem virtual do sistema ($z=0$), ponto a partir do qual as revoluções do motor passam a ser contabilizadas. Esta referência é crucial para a função de Homing, que permite o retorno automático do parafuso à posição inicial com precisão.

Adicionalmente, implementou-se a função de segurança "Definir Limite" (Set Limit). Este recurso permite configurar via software o curso útil máximo do parafuso, criando barreiras virtuais que impedem o avanço excessivo do atuador. Essa medida é essencial para preservar a integridade estrutural do dispositivo e evitar danos à amostra ou ao sensor de carga por esmagamento acidental.

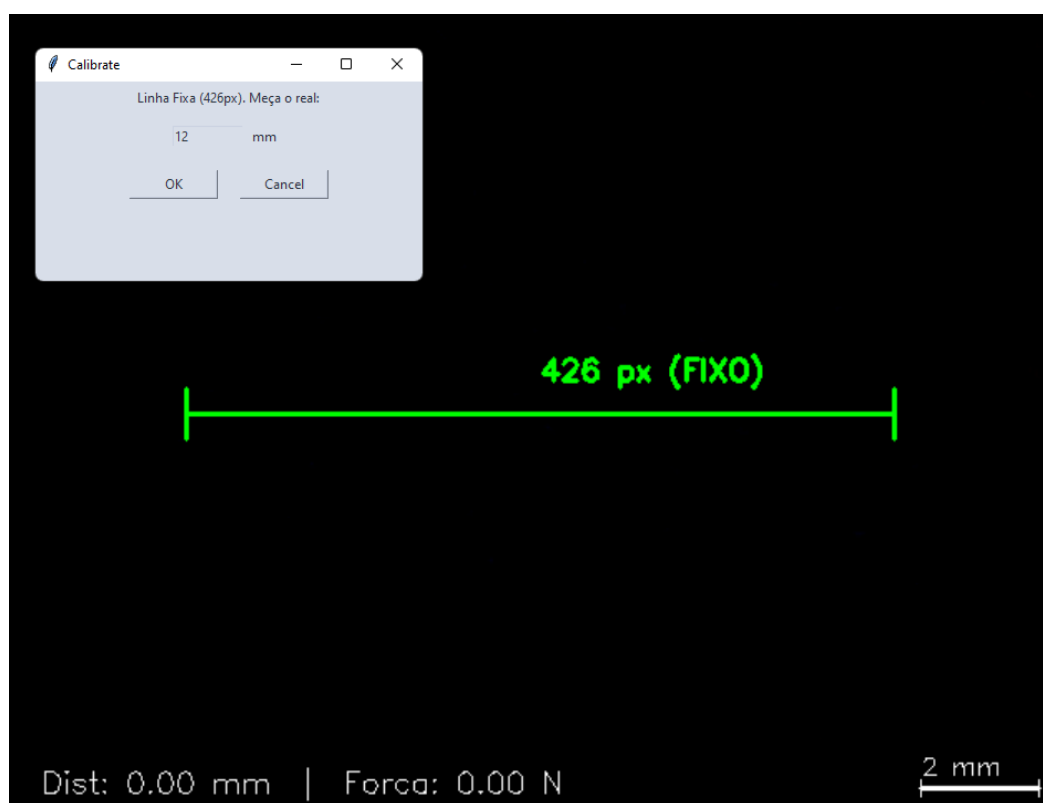
3.5.2 Calibração Óptica e Fator de Escala

A segunda vertente do processo de validação consiste na calibração dimensional óptica, técnica fundamentada nos princípios de fotogrametria 2D. Esta etapa é imprescindível para estabelecer a função de transferência que converte as

coordenadas discretas da imagem (pixels) em grandezas físicas reais (milímetros ou micrômetros).

Para a operacionalização deste método, utilizou-se o recurso nativo do software de captura denominado 'Gerenciador de Calibração'. Esta ferramenta permite a sobreposição de uma régua virtual sobre a imagem, definindo uma linha base para a conversão. Conforme ilustrado na Figura 14, foi estabelecido um vetor de referência fixo com comprimento de 426 pixels, o qual servirá como denominador para o cálculo do fator de escala.

Figura 14 – Sistema de calibração da escala de medida.

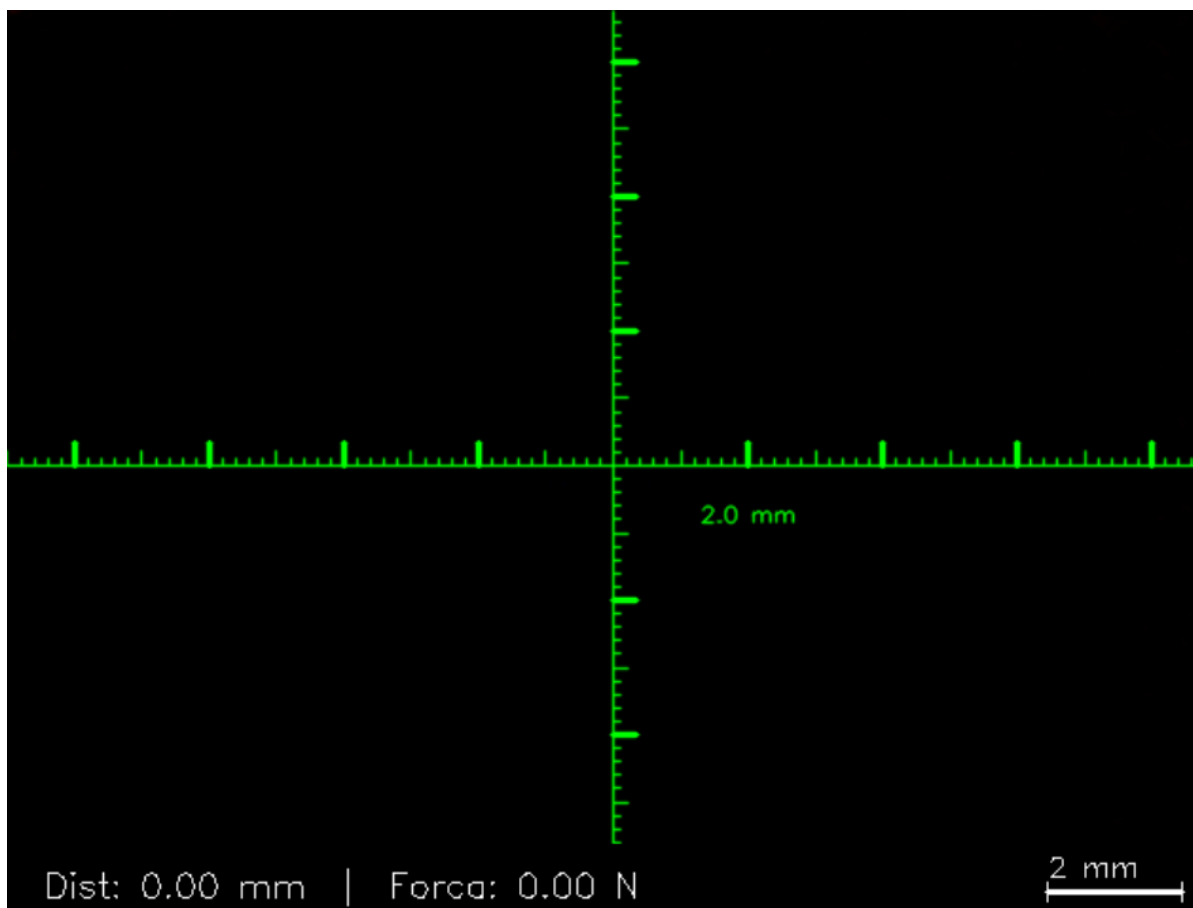


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O procedimento utiliza um padrão de calibração microscópica (lâmina micrométrica) fornecido com o equipamento óptico. Com o foco ajustado, o operador correlaciona a distância conhecida do padrão físico com a linha de referência virtual. O algoritmo então calcula o fator de conversão (razão mm/pixel) e gera automaticamente uma régua adaptativa escalonada sobre a imagem. Isso permite que

qualquer deformação visualizada na tela seja quantificada com precisão, validando os dados de deflexão durante os ensaios, apresentado pela Figura 15.

Figura 15 – Tela do microscópio com escala calibrada.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Utilizando um material com geometria conhecida, neste caso sendo a placa de fenolite, é medida utilizando um paquímetro de precisão, no software de análise de imagem, obtidos no manual do microscópio e instalando os drivers necessários, permitindo a conversão para o fator de escala. Na Figura 16 é possível observar que a placa de fenolite foi utilizada para aferir a resolução e escala do microscópio digital, para garantir que a medida obtida na tela do computador corresponda com a medida física do objeto, também possibilitou verificar as funções de luminosidade e ajuste de foco do próprio microscópio.

Figura 16 – Calibragem do microscópio.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Durante a execução dos ensaios, o algoritmo desenvolvido em Python atua como o orquestrador do sistema, gerenciando simultaneamente o controle de passo do motor e o acionamento da captura de imagens. Esta sincronização garante o registro detalhado do comportamento da amostra em todas as fases do experimento, documentando desde a deflexão inicial até o momento da ruptura (e o comportamento pós-falha), aproveitando a capacidade de captura de vídeo/frames do microscópio.

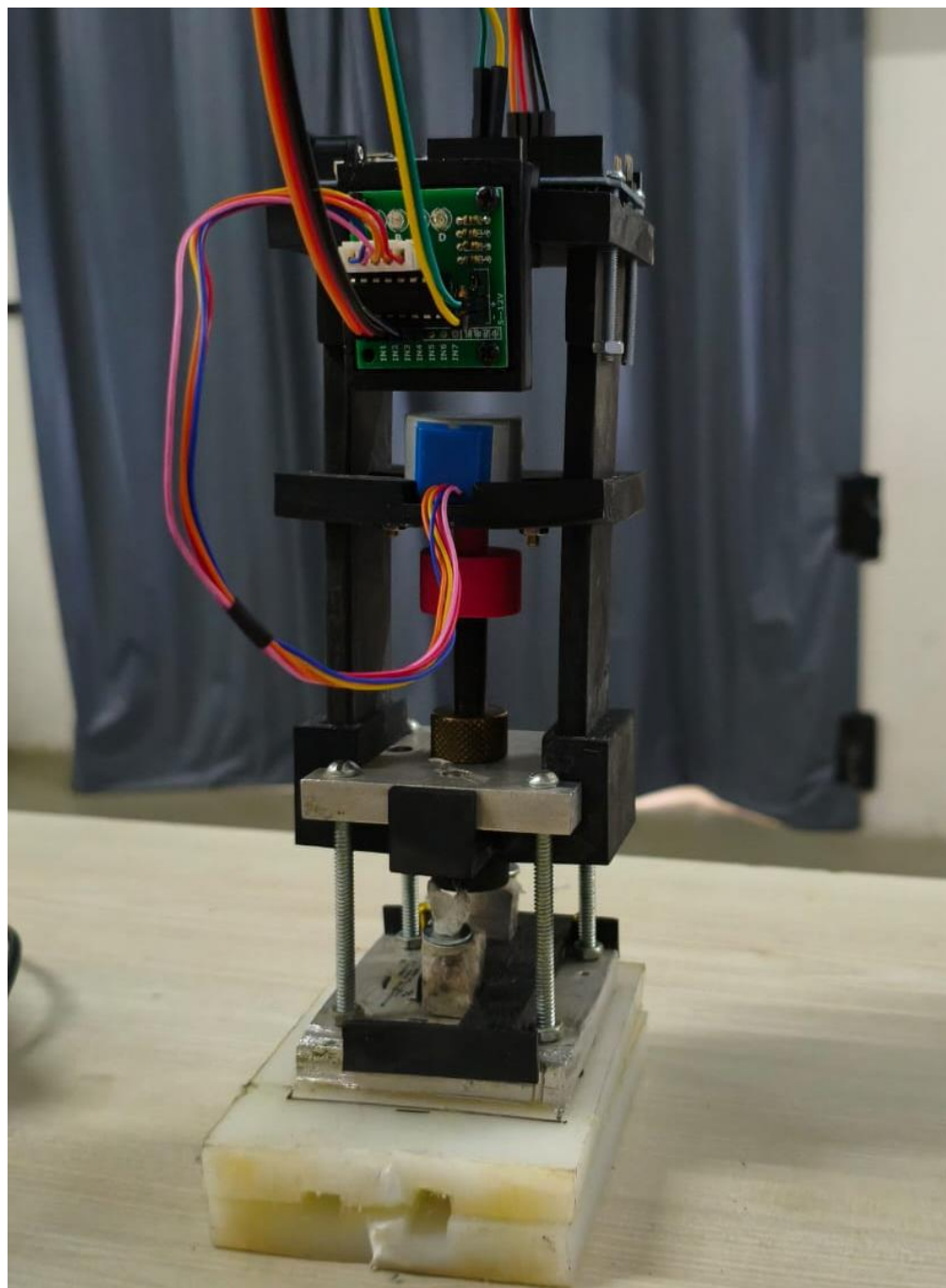
Posteriormente, as imagens resultantes são submetidas a um pós-processamento utilizando o software *ImageJ*. Nesta etapa, realiza-se a mensuração manual da deflexão máxima em cada quadro capturado. Este procedimento manual é fundamental, pois serve como método de aferição e contraprova, permitindo validar a acurácia e a confiabilidade das medições obtidas automaticamente pelo sistema desenvolvido.

3.6 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

A montagem final do protótipo representa a consolidação de todos os subsistemas anteriormente descritos (estrutural, mecânico e eletrônico). O processo de integração seguiu uma abordagem modular e sequencial, priorizando o alinhamento concêntrico dos eixos de transmissão e a estabilidade global do equipamento.

A arquitetura do dispositivo foi organizada em níveis funcionais: a base metálica atua como o alicerce rígido para o sistema de atuação mecânica (parafuso micrométrico e motor), enquanto os componentes impressos em 3D garantem a fixação e o acoplamento preciso entre as partes móveis. Por fim, o nível superior do conjunto abriga a eletrônica de controle, estrategicamente posicionada para isolar o cabeamento das áreas de movimento e facilitar a conexão com o computador. A Figura 17 apresenta o protótipo em sua configuração operacional completa, pronto para a realização dos ensaios.

Figura 17 – Montagem do protótipo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para assegurar o condicionamento adequado do corpo de prova durante os experimentos, acoplou-se à estrutura o suporte de fixação dedicado. Este componente desempenha a função crítica de restringir movimentos espúrios da amostra, garantindo que a carga seja aplicada. A configuração final deste subconjunto, concebida especificamente para atender aos requisitos geométricos do ensaio de flexão em três pontos, apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Base de fixação da amostra.



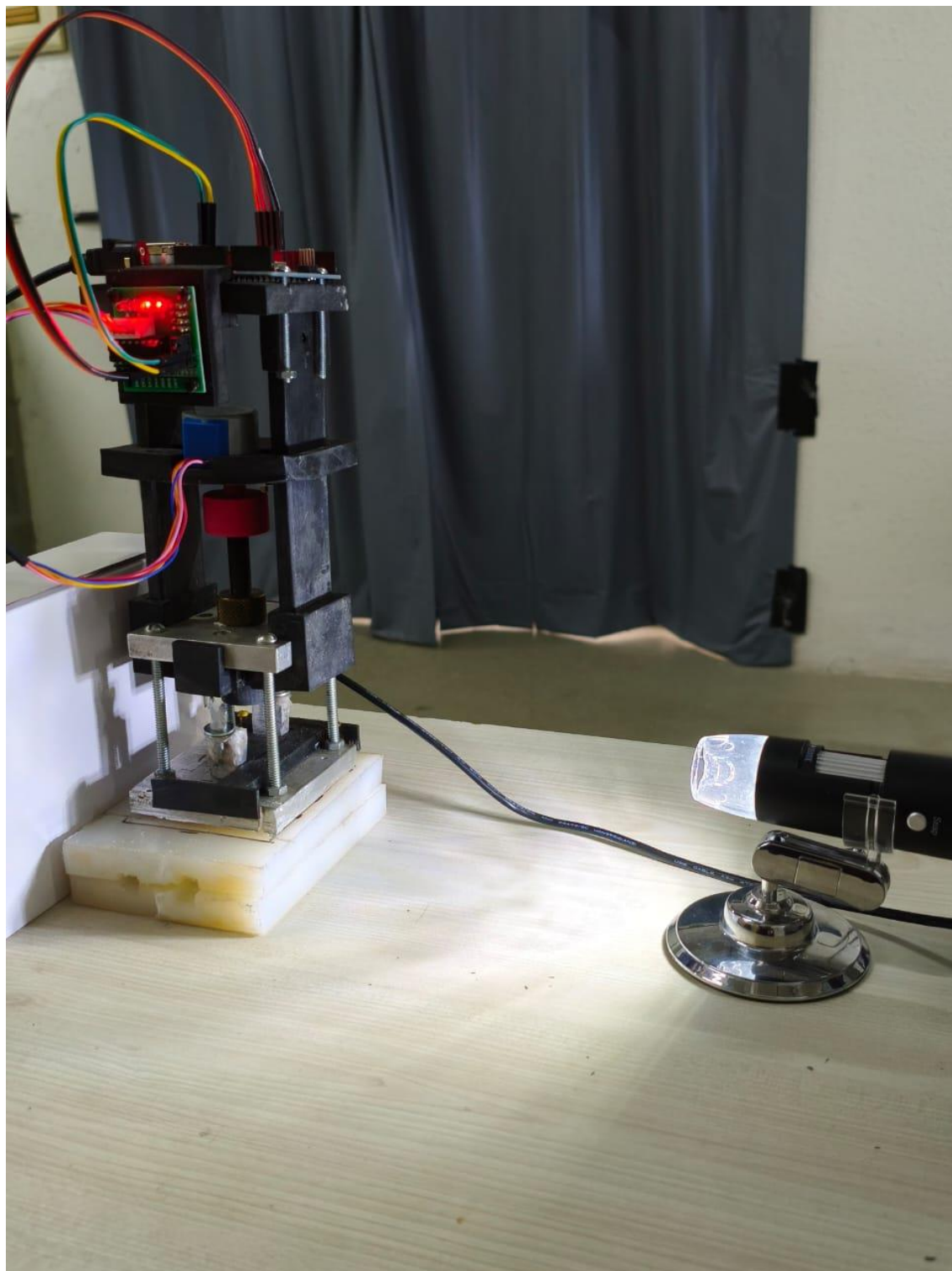
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Especificamente quanto à geometria do ensaio, os apoios fixos foram estabelecidos com um distanciamento de 45 mm entre si. Esta configuração assegura que a amostra seja posicionada de forma centralizada em relação ao eixo de atuação do parafuso micrométrico, para a validade dos cálculos de tensão em vigas biapoiadas. Além disso, foi construído garras de fixação para poder verificar o teste para materiais maleáveis, como o fio de estanho, necessário para verificar o limite de deformação do material com a força aplicada pelo motor, com a ausência das garras o algoritmo de rastreamento detectou uma falsa deformação do fio de estanho, onde o mesmo havia apenas se deslocado, contudo, para os testes em chapas de latão não houve a necessidade de usar as garras de fixação, visto que o material oferece resistência elevada. O design do suporte foi otimizado para não obstruir o campo de visão do sistema óptico, permitindo o monitoramento contínuo da zona de deformação máxima.

Por fim, vale ressaltar que a arquitetura modular do conjunto oferece vantagens significativas de manutenibilidade. A disposição dos componentes permite a substituição individual de peças ou ajustes de hardware sem a necessidade de desconstrução total do equipamento, garantindo uma vida útil prolongada ao protótipo.

A consolidação final de todos os subsistemas, mecânicos, eletrônicos e ópticos, resulta no dispositivo completo apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Dispositivo de medição de tensão mecânica.

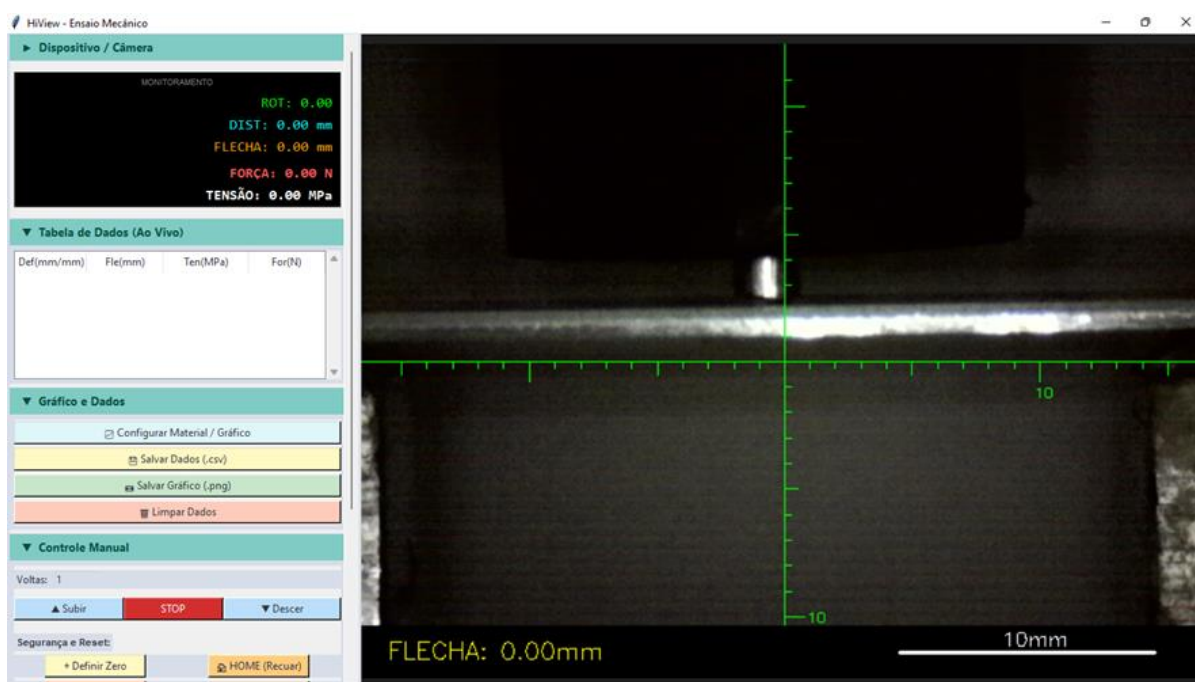


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Um parâmetro crítico observado na integração final refere-se ao posicionamento relativo do sistema óptico. Foi estabelecida uma distância linear de 22 cm (220 mm) entre o centro da base de ensaio e o ponto focal do microscópio. Esta configuração geométrica foi determinada para otimizar o Campo de Visão (FOV), assegurando que o enquadramento digital englobe a totalidade do vão entre os apoios (de 45 mm), permitindo a visualização completa da amostra submetida à flexão.

Com o hardware alinhado, o fluxo de vídeo é transmitido em tempo real para o software de controle. A Figura 20 apresenta a Interface Gráfica do Usuário (GUI) em estado de prontidão, exibindo o posicionamento inicial do corpo de prova antes da execução da rotina de testes.

Figura 20 – Software de controle do dispositivo medidor de tensão mecânica.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A visualização nítida da amostra e dos apoios na interface gráfica, permitida pela aplicação direta da luz advinda do próprio microscópio digital, isso confirma o êxito da calibração óptica e o alinhamento correto dos componentes físicos. Desta forma, o protótipo encontra-se plenamente operacional, com a comunicação entre o hardware de atuação, o sistema de visão e o software de controle devidamente estabelecida. Com a integração do sistema concluída e validada, o dispositivo reúne

as condições técnicas necessárias para a execução dos ensaios de flexão e a consequente aquisição de dados experimentais.

3.7 ENSAIO MECÂNICO

O ensaio seguiu os princípios de flexão em três pontos estabelecidos pela norma ASTM D790 (2017), com as devidas adaptações à geometria reduzida do protótipo. O procedimento experimental foi padronizado para garantir a repetibilidade das medições, consistindo nas seguintes etapas operacionais:

Primeiramente, o corpo de prova é posicionado sobre os roletes de apoio, sendo cuidadosamente alinhado para garantir que o ponto de aplicação da carga coincida exatamente com o centro geométrico da amostra. A distância entre os apoios foi mantida fixa em 45 mm.

A execução do teste ocorre em regime quase-estático, onde o atuador, comandado pelo microcontrolador, impõe um deslocamento vertical constante ao centro da viga. Durante o carregamento, o sistema de visão computacional registra simultaneamente a deflexão da amostra, permitindo o monitoramento do comportamento do material desde a fase elástica linear até a ruptura ou deformação máxima permitida pelo gabarito.

Simultaneamente à execução mecânica, o software de controle realiza o processamento computacional dos dados brutos em tempo real. O algoritmo converte as grandezas digitais (passos do motor e pixels da imagem) em propriedades mecânicas, utilizando o embasamento matemático apresentado na fundamentação teórica. O fluxo de cálculo ocorre em três etapas síncronas:

.

3.7.1 Determinação da Força Aplicada

Diferentemente de máquinas universais equipadas com células de carga dedicadas, o protótipo adota uma abordagem de Controle de Deslocamento com Monitoramento de Capacidade. O software de controle realiza um balanço de forças instantâneo para validar a execução do ensaio, onde o algoritmo calcula a tensão no material obtida através da deformação medida, e determina a força naquele instante, à parte, o código usa a força calculada e subtrai da força máxima que o motor é capaz de gerar, quando este valor chega a zero o software para de enviar comando para o

dispositivo, esse sistema foi útil para funcionar como um sistema de segurança, evitando a sobrecarga do motor e a queima dos componentes.

A parametrização dos limites de segurança do software fundamentou-se nas especificações técnicas do atuador. Para determinar a capacidade de carga do sistema, consultou-se o datasheet do fabricante do motor de passo 28BYJ-48, o qual especifica um torque de tração nominal de aproximadamente 0,0343 Nm, fornecido pelo datasheet do motor de passo.

A conversão desta grandeza rotacional em força linear axial (F_{max}) foi realizada analiticamente através da equação fundamental de transmissão de potência para fusos, onde a equação é dada por:

$$F_{max} = \frac{2\pi \cdot T \cdot \eta}{p} \quad (14)$$

Onde:

T : Torque do motor;

p : Passo da rosca;

η : Rendimento mecânico.

Foi considerando o passo de rosca medido de 0,37 mm, valor esse que foi calculado medindo o deslocamento do parafuso de acordo com o número de rotações. Para a eficiência mecânica, foi considerado um valor mais conservador para o acoplamento ($\eta \approx 0,30$), que diferentemente de fusos de esferas ou roscas trapezoidais projetadas especificamente para a transmissão de potência industrial, o protótipo emprega uma rosca métrica de perfil triangular. Conforme a literatura clássica para projetos de máquinas (Budynas; Nisbett, 2016; Norton, 2013), o perfil desse tipo de rosca acaba por gerar muito atrito, ocasionado deslizamento entre os flancos da rosca e a porca, acarretando numa eficiência muito baixa que não ultrapassa os 40%. De tal forma determinou-se que o atuador é capaz de exercer uma força teórica máxima de aproximadamente 174 N antes de perder sincronismo.

Com base neste parâmetro limite estabelecido pelo datasheet, o sistema opera sob uma lógica de Monitoramento de Capacidade. Sabendo-se que a mola de retorno exerce uma força contrária linearmente crescente ($F_{mola} = k \cdot x$), o software calcula a Força Líquida Disponível (F_{disp}) em tempo real através da Equação (14):

$$F_{disp} = F_{max} - (k \cdot x) \quad (15)$$

onde (x) é o deslocamento vertical do atuador. O valor de F_{disp} representa a capacidade máxima de carga que o dispositivo pode aplicar sobre a amostra naquele instante específico antes que o motor atinja seu limite de torque. Este parâmetro serve como um indicador de segurança, caso a resistência estimada do material (baseada em seu módulo teórico) se aproxime de F_{disp} , o sistema alerta sobre a saturação do atuador, pois quando a amostra oferece muita resistência, além do suportado pelo motor, o leitor de medidas baseado no tracking da imagem torna-se incapaz de determinar o deslocamento real da deflexão, já que seu sistema é baseado no avanço do parafuso, desta forma, garantindo que os dados de deformação coletados pela câmera sejam resultantes de um movimento contínuo e não de falhas no acionamento.

3.7.2 Medição da Deflexão via Rastreamento Óptico de Deslocamento

A medida da flecha (δ) no centro da amostra é dissociada do movimento do motor para garantir a imunidade contra folgas mecânicas da estrutura. O algoritmo de visão computacional rastreia o deslocamento vetorial de um ponto de interesse na imagem. O valor em pixels é convertido para milímetros utilizando o fator de escala (S_{cal}) obtido na etapa de calibração óptica (Seção 3.5.3), gerando o valor real da deflexão (δ) a cada quadro capturado.

3.7.3 Cálculo de Tensão Baseado no Modelo Elástico

A determinação das propriedades mecânicas pelo software adota uma metodologia inversa às máquinas universais tradicionais. Em vez de derivar a tensão a partir de uma célula de carga (suscetível a ruídos em baixas forças), o sistema utiliza o Modelo Elástico Linear como referência de validação.

O usuário insere o Módulo de Elasticidade (E) esperado para o material da amostra nas configurações. Durante o ensaio, o software calcula a Deformação Específica Real (ϵ) baseada exclusivamente na flecha (δ) no ponto de aplicação da carga medida pela câmera, utilizando a Equação (12). A Tensão (σ) é então derivada pela relação constitutiva:

$$\sigma_{calc} = E_{input} \cdot \epsilon_{visual} \quad (15)$$

Simultaneamente, o software monitora a força aplicada pelo motor (conforme descrito na seção 3.7.1) apenas para garantir a integridade cinemática do ensaio. Como produto final do processamento de dados, o software gera e exibe em tempo real um Gráfico Comparativo de Deslocamento, que constitui a principal ferramenta de validação do ensaio. Este gráfico mostra duas curvas distintas simultaneamente:

1. **A Curva de Comando (Referência):** Representa o deslocamento teórico linear do atuador, calculado a partir da contagem de passos enviados ao motor. Esta linha serve como o comportamento ideal do sistema caso não houvesse resistências mecânicas ou deformações elásticas na estrutura da máquina.
2. **A Curva de Medição (Real):** Representa a deflexão física da amostra capturada por rastreamento óptico de deslocamento.

A análise visual da discrepância entre estas duas curvas fornece um diagnóstico imediato sobre a rigidez do conjunto. A área entre a linha de comando e a linha medida revela a Histerese Mecânica e a complacência do sistema (deformação da mola e assentamento dos componentes). Desta forma, o gráfico não apenas documenta o comportamento do material, mas autovalida a qualidade do ensaio, permitindo distinguir o que é deformação real do corpo de prova e o que é acomodação do dispositivo.

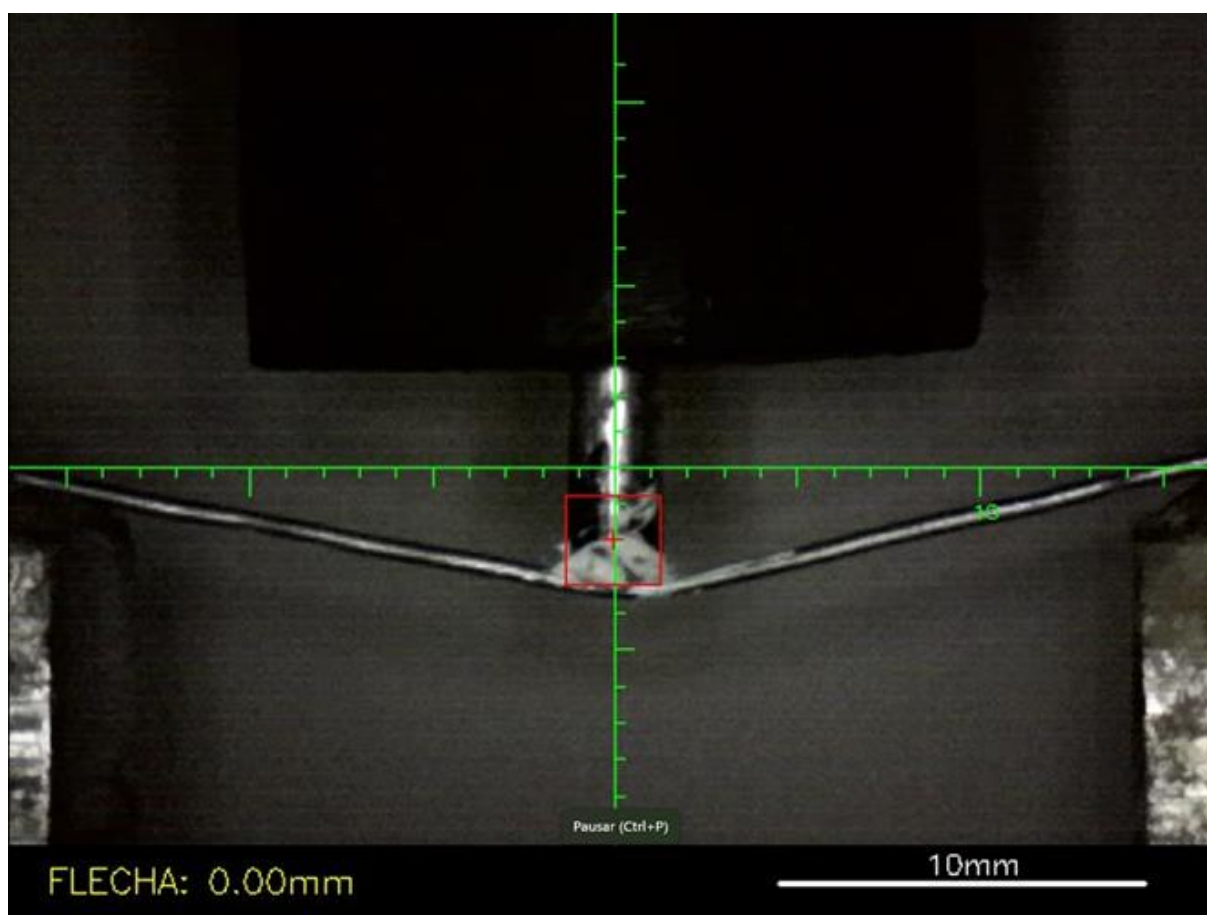
3.8 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A etapa de validação experimental iniciou-se com testes funcionais de "estresse de software", visando assegurar a estabilidade dos sistemas de controle e a resposta aos comandos de automação. Nesta fase preliminar, o foco recaiu sobre a análise comportamental do dispositivo, verificando a ausência de erros lógicos em processos de longa duração em detrimento da caracterização do material em si. Após as correções de firmware pertinentes, procedeu-se aos ensaios específicos utilizando corpos de prova padronizados.

3.8.1 Ensaio em Material Dúctil (Liga Sn60/Pb40)

Para a primeira bateria de testes, utilizou-se um fio de liga de solda (Estanho-Chumbo Sn60/Pb40) com diâmetro de 0,6 mm e vão livre de 45 mm, como mostra a Figura 21. Para a validação do modelo elástico no software, adotou-se o Módulo de Young de referência de 30 GPa. Este valor baseia-se nas especificações técnicas da fabricante Coining [2026], que indicam módulos próximos a 29,99 GPa, situando-se dentro da faixa experimental de 9 a 48 GPa relatada na literatura para soldas eutéticas.

Figura 21 –Teste em fio de liga de Sn60/Pb40.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Durante a experimentação, observou-se uma divergência entre a tensão teórica calculada (536,66 MPa) e a resistência real do material. Sabendo-se que o estanho possui um limite de escoamento baixo (aproximadamente 15 MPa), o valor elevado calculado pelo software, que opera configurado para o regime elástico linear (Lei de Hooke), indica que a amostra sofreu deformação plástica severa. O sistema projetou

a tensão que seria necessária para causar tal deformação caso o material fosse infinitamente elástico.

Já no segundo experimento com este material, registrou-se um limite de tensão aparente de 576,24 MPa (conforme Gráfico B.2, Apêndice B). A partir desse ponto, mesmo com o *software* comandando o avanço do fuso, a câmera parou de registrar a deformação na amostra. Isso não indica o limite do material testado, mas sim o limite mecânico do próprio equipamento. Na prática, o movimento do atuador deixou de dobrar a peça e passou a ser dissipado de duas maneiras possíveis:

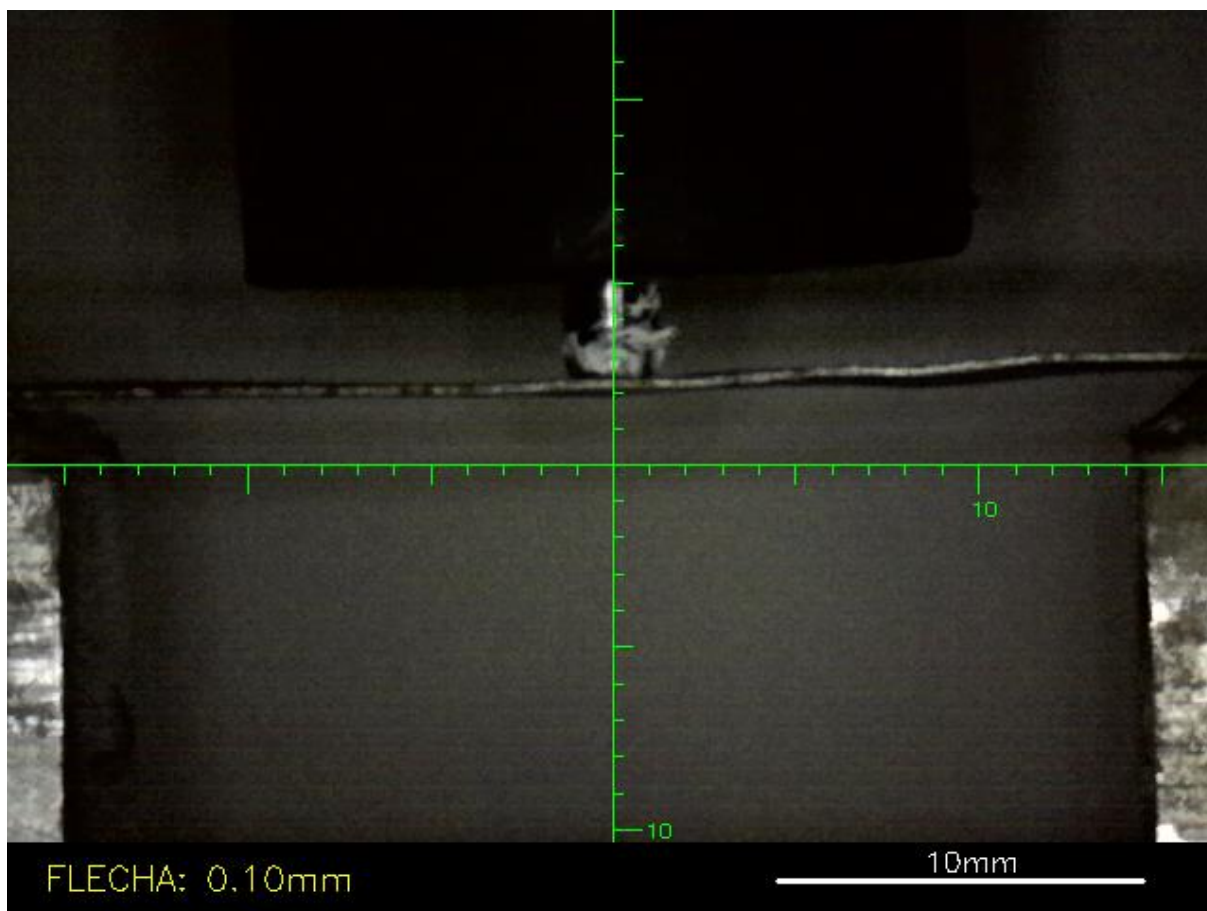
1. A estrutura do protótipo não suportou a carga de reação e começou a ceder, absorvendo o deslocamento;
2. O motor de passo atingiu seu limite de torque e começou a perder passos. Nesse último cenário, o sistema registra o avanço no código, mas o eixo do motor trava fisicamente e não gira.

Essa discrepância valida a robustez do motor em manter o deslocamento mesmo na fase plástica profunda do material.

3.8.2 Ensaio em Material Rígido (Latão)

Para validar as equações de segurança operacional e testar a robustez do algoritmo de rastreamento em superfícies difíceis, submeteu-se o protótipo a ensaios de estresse utilizando chapas de Latão (liga Cu-Zn), com comprimento de 45mm e espessura de 0,45mm, como mostra a Figura 22. Segundo a base de dados da AZoM [2026], ligas de latão apresentam Módulo de Elasticidade típico entre 90 e 120 GPa, adotou-se o valor mínimo de 90 GPa para os cálculos.

Figura 22 –Teste em chapa de latão (Cu-Zn).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No primeiro ensaio, o sistema comportou-se conforme previsto pelo modelo matemático de segurança (Seção 3.7.1). A tensão calculada aumentou linearmente até o patamar de 224,03 MPa, ponto em que houve a estagnação física do avanço do punção (Gráfico B.3, Apêndice B). Este valor corrobora o cálculo de torque máximo do motor, indicando que a força resistiva da amostra somada à carga da mola igualou a capacidade de tração do fuso (174,14 N), validando o envelope de operação segura do dispositivo.

Contudo, os ensaios subsequentes evidenciaram a sensibilidade do sistema óptico a superfícies. No segundo e terceiro testes, foram registrados valores de tensão anômalos de 304,13 MPa e 501,02 MPa, respectivamente. A análise detalhada dos dados brutos (Gráficos B.4 e B.5, Apêndice B) indicou que estes valores não representam a resistência física do material, mas sim causas numéricas decorrentes da perda de rastreamento (*tracking loss*).

Especificamente no segundo ensaio, o gráfico de monitoramento revelou que, enquanto o motor enviava comandos de descida, o valor da flecha medida começou a decrescer abruptamente. Fenomenologicamente, é impossível que a deflexão diminua enquanto a carga aumenta. Isso evidencia que o algoritmo de *Template Matching* "desprende-se" do ponto de referência original na superfície reflexiva do latão, provável efeito que decorreu de variações de iluminação alterando o padrão de pixels e de ruídos estáticos de imagem, passando a rastrear uma região estática ou com movimento inverso.

Esta ocorrência justifica a decisão metodológica de utilizar o gráfico comparativo de Deslocamento do Motor vs. Flecha Visual como ferramenta primária de validação. A divergência incoerente entre a curva comandada (linear crescente) e a curva medida (errática nestes testes) atua como um mecanismo eficaz de diagnóstico, permitindo ao operador descartar automaticamente ensaios onde a integridade do algoritmo de rastreamento foi comprometido.

4 CONCLUSÃO

Os estudos a respeito das tensões mecânicas e do comportamento dos materiais desempenham um papel central na engenharia, sendo determinantes para o dimensionamento seguro de estruturas e componentes. Neste contexto, o presente trabalho atingiu seu objetivo principal ao desenvolver, prototipar e validar um dispositivo automatizado de custo econômico para ensaios de flexão em três pontos, integrando conceitos de mecânica, eletrônica e visão computacional.

O medidor foi construído por meio de uma abordagem multidisciplinar, combinando a precisão da usinagem em componentes estruturais com a versatilidade da manufatura aditiva (impressão 3D) para peças complexas. A arquitetura modular adotada, utilizando o microcontrolador Arduino e o motor de passo com redução, provou-se eficiente para o controle rigoroso dos deslocamentos micrométricos. Além disso, a implementação do rastreamento óptico de deslocamento como método de medição eliminou a necessidade de sensores de contato onerosos, permitindo a aferição de deformações diretamente através da análise de imagem.

Os testes de funcionamento mostraram que o equipamento pode ser usado como uma ferramenta para fins didáticos e experimentais. A integração entre o software de controle em Python e o hardware de atuação garantiu a sincronia necessária entre a aplicação da carga e a captura dos dados. A calibração do sistema óptico demonstrou que é possível obter resoluções na escala de micrômetros utilizando equipamentos acessíveis, desde que submetidos a um rigoroso processo de ajuste e validação.

A inovação metodológica de utilizar o Módulo de Elasticidade teórico como parâmetro de entrada permitiu transformar o equipamento em uma ferramenta de validação robusta. Ao comparar graficamente o deslocamento físico imposto pelo motor com a flecha real capturada por rastreamento óptico de deslocamento, o sistema foi capaz de evidenciar a histerese mecânica e garantir que apenas a deformação real da amostra fosse considerada, superando as limitações de folgas mecânicas típicas de equipamentos mais simples.

Apesar do êxito na validação do protótipo, o desenvolvimento esbarrou em desafios inerentes à manufatura de baixo custo, que representam oportunidades para trabalhos futuros. A principal dificuldade técnica consistiu no desenvolvimento do código na programação do software e na modelagem das peças impressas em 3D.

Além disso, a resolução nativa da câmera limitou a sensibilidade do algoritmo para capturar microdeformações em estágios iniciais de ensaio. Para as próximas iterações do equipamento, recomenda-se a substituição gradual de componentes estruturais fabricados por manufatura aditiva em resina por peças usinadas em ligas metálicas de maior rigidez, além do emprego de um sistema de aquisição de imagens com maior resolução geométrica.

Conclui-se, portanto, que a importância deste trabalho transcende a construção física do protótipo. O projeto apresenta um ganho significativo para a comunidade acadêmica ao demonstrar que a instrumentação de alta precisão não está restrita a equipamentos industriais de custo elevado. A metodologia desenvolvida oferece uma alternativa viável para laboratórios de ensino e pesquisa com recursos limitados, promovendo a democratização do conhecimento prático em resistência dos materiais e incentivando o desenvolvimento de soluções baseadas em tecnologia aberta e acessível.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI G. JR., Armando; SOUSA, André R. de. **Metrologia Científica e Industrial**. 2. ed. Barueri: Manole, 2018.
- ANYCUBIC. **Photon Mono X 6Ks**: User Manual. Shenzhen: Anycubic Technology Co., 2023. Disponível em: <https://www.anycubic.com>. Acesso em: 5 dez. 2025.
- ARDUINO. **Arduino IDE - Arduino Documentation**. [S. l.], 2026. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/software/ide/>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E111**: Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- AZoM. **Properties**: Copper Alloys - Brasses. [S. l.], [2026]. Disponível em: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=63>. Acesso em: 14 jan. 2026.
- BANZI, Massimo; SHILOH, Michael. **Primeiros Passos com o Arduino**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2015.
- BOLTON, William. **Mecatrônica**: Uma Abordagem Multidisciplinar. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- BRADSKI, Gary; KAEHLER, Adrian. **Learning OpenCV**: Computer Vision with the OpenCV Library. Sebastopol: O'Reilly Media, 2008.
- BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC). **Ensaio de dobramento para materiais frágeis**. CIMM - Medição, controle e ensaios. 25 fev. 2010. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6596-ensaio-de-dobramento-para-materiais-frageis. Acesso em: 20 mar. 2026.
- COINING. **Data Sheet**: 60 Tin-40 Lead - Physical Properties of Bulk Solder. Montvale: Coining Inc., [2026]. Disponível em: <http://www.coininginc.com>. Acesso em: 14 jan. 2026.
- DIETER, George E. **Mechanical Metallurgy**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Processamento Digital de Imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- GUIA de Montagem: Como Conectar e Controlar um Motor de Passo com Arduino. **Blog Saravati**, [S. l.], [2026]. Disponível em: <https://blog.saravati.com.br/montagem-motor-de-passo-com-arduino/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física, volume 1: mecânica**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HERTZBERG, Richard W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 5. ed. New York: Wiley, 2012.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). 1. ed. luso-brasileira. Rio de Janeiro: Inmetro, 2012.

MONK, Simon. **Programação com Arduino**: Começando com Sketches. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

POPOV, Egor P. **Engineering Mechanics of Solids**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro U. B. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. 8. ed. São Paulo: Érica, 2011.

TIMOSHENKO, Stephen P. **History of Strength of Materials**. New York: Dover Publications, 1983.

APÊNDICE A – DADOS BRUTOS DA CALIBRAÇÃO DA MOLA HELICOIDAL

Tabela A.1 – Dados brutos da 1ª medida de calibração da mola.

Comp. Final (mm)	Deformação (x)	Massa (g)	Força (N)	K (N/mm)
18	2	80	0,78	0,392
17	3	120	1,18	0,393
16	4	131	1,28	0,321
15	5	217	2,13	0,426
14	6	263	2,58	0,430
13	7	257	2,52	0,360
12	8	303	2,97	0,371
11	9	388	3,8	0,422
10	10	421	4,13	0,413
9	11	425	4,17	0,379
8	12	475	4,66	0,388

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota: Força calculada considerando $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Tabela A.2 – Dados brutos da 2ª medida de calibração da mola.

Comp. Final (mm)	Deformação (x)	Massa (g)	Força (N)	K (N/mm)
20	0	0	0	0,000
18	2	111	1,09	0,545
17	3	140	1,37	0,458
16	4	176	1,73	0,432
15	5	198	1,94	0,388
14	6	218	2,14	0,356
13	7	259	2,54	0,363
12	8	301	2,95	0,369
11	9	350	3,43	0,381
10	10	401	3,93	0,393

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota: Continuação dos dados experimentais da calibração. A Força foi calculada com $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Tabela A.3 – Dados brutos da 3ª medida de calibração da mola.

Comp. Final (mm)	Deformação (x)	Massa (g)	Força (N)	K (N/mm)
19	1	45	0,44	0,441
18	2	96	0,94	0,471
17	3	142	1,39	0,464
16	4	160	1,57	0,392
15	5	203	1,99	0,398
14	6	230	2,26	0,376
13	7	255	2,5	0,357
12	8	296	2,9	0,363
11	9	350	3,43	0,381
10	10	403	3,95	0,395
9	11	446	4,37	0,398
8	12	497	4,88	0,406

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota: Continuação dos dados experimentais da calibração. A Força foi calculada com $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Tabela A.4 – Dados brutos da 4ª medida de calibração da mola.

Comp. Final (mm)	Deformação (x)	Massa (g)	Força (N)	K (N/mm)
19	1	76	0,75	0,750
18	2	95	0,93	0,470
17	3	122	1,2	0,400
16	4	178	1,75	0,440
15	5	200	1,96	0,390
14	6	230	2,26	0,380
13	7	262	2,57	0,370
12	8	290	2,84	0,360
11	9	333	3,27	0,360
10	10	412	4,04	0,400
9	11	451	4,42	0,400
8	12	499	4,89	0,410

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota: Continuação dos dados experimentais da calibração. A Força foi calculada com $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Tabela A.5 – Dados brutos da 5ª medida de calibração da mola.

Comp. Final (mm)	Deformação (x)	Massa (g)	Força (N)	K (N/mm)
19	1	53	0,52	0,520
18	2	88	0,86	0,430
17	3	131	1,29	0,430
16	4	165	1,62	0,400
15	5	200	1,96	0,390
14	6	241	2,36	0,390
13	7	267	2,62	0,370
12	8	301	2,95	0,370
11	9	344	3,37	0,370
10	10	396	3,88	0,390
9	11	450	4,41	0,400
8	12	506	4,96	0,410

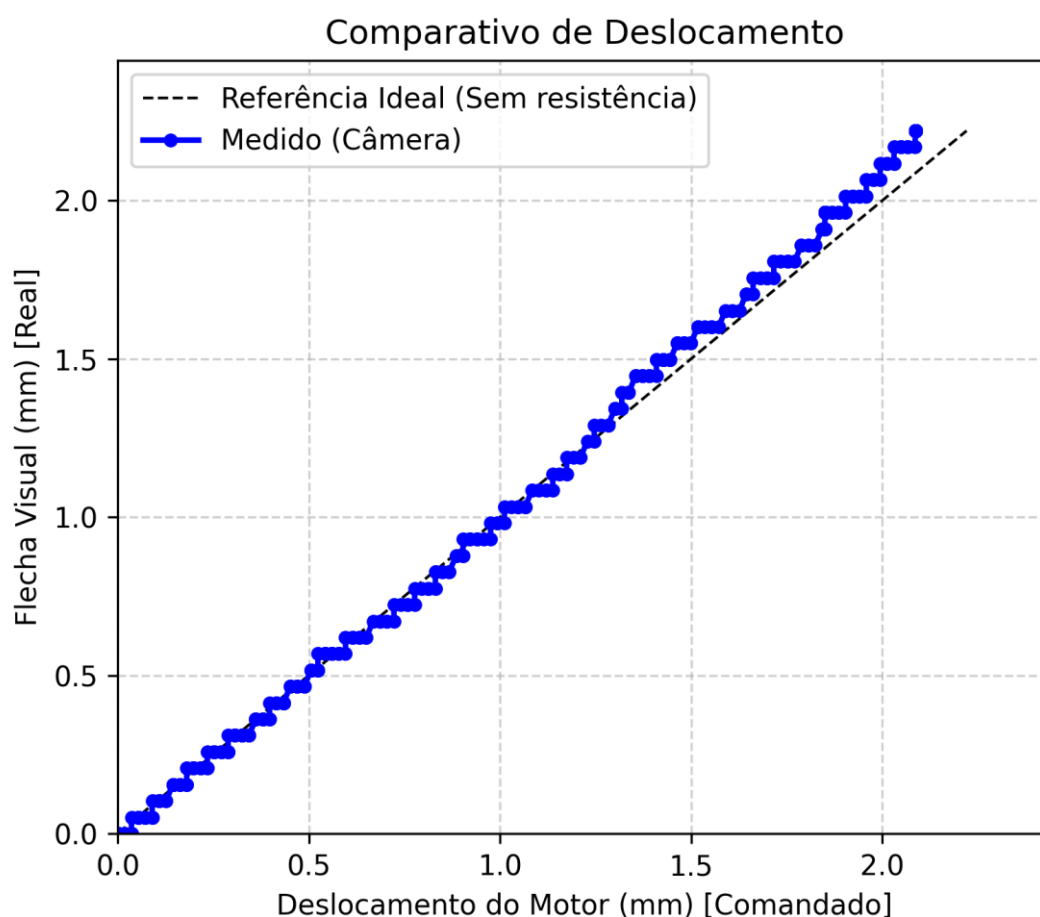
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota: Continuação dos dados experimentais da calibração. A Força foi calculada com $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

APÊNDICE B – RELATÓRIOS GRÁFICOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

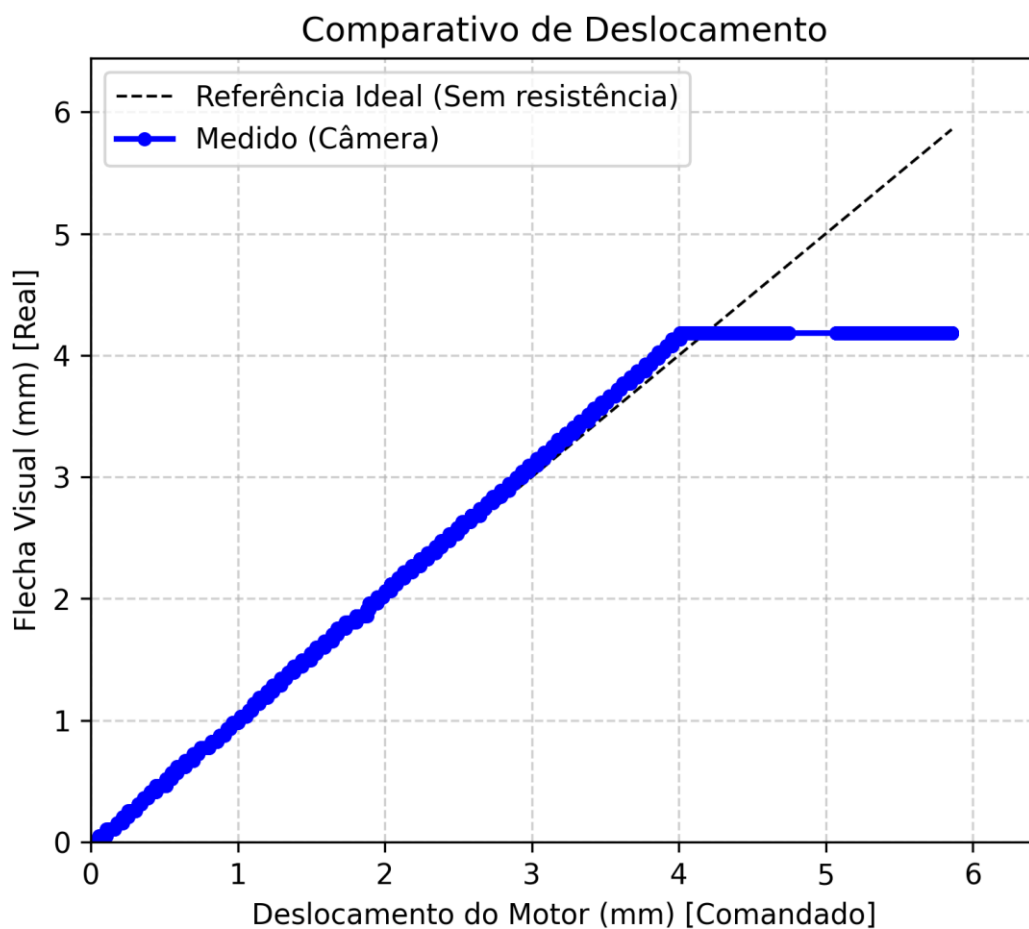
Este apêndice compila as curvas comparativas geradas pelo software de controle durante a fase de validação experimental. Os gráficos confrontam o deslocamento comandado ao motor (eixo X) com a deflexão real mensurada por Rastreamento óptico de deslocamento (eixo Y), permitindo diagnosticar o comportamento mecânico do material e a estabilidade do sistema de medição.

Figura B.1 – Ensaio 1 em fio de solda Sn60/Pb40: Comportamento elasto-plástico inicial.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

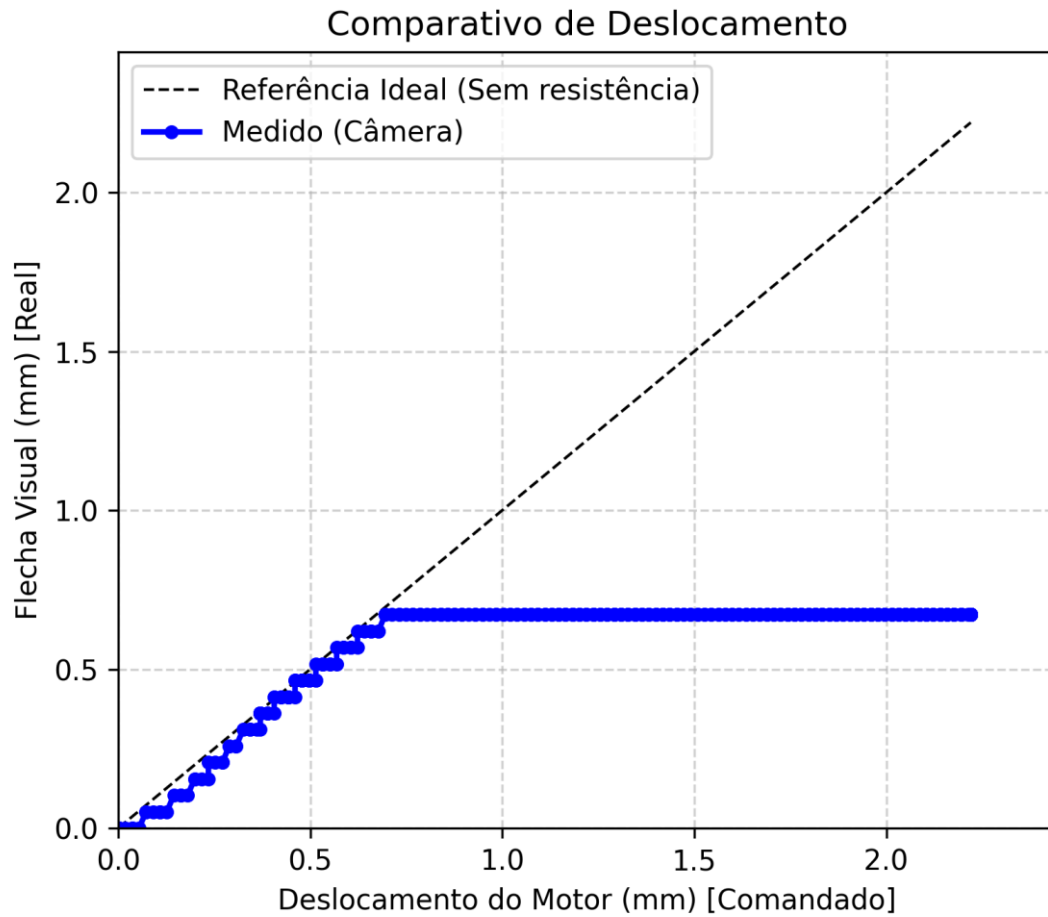
Figura B.2 – Ensaio 2 em fio de solda Sn60/Pb40: Saturação por deformação plástica severa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota: O platô horizontal indica que o material continuou a deformar sem resistência elástica significativa ou que o deslocamento excedeu a janela de rastreamento.

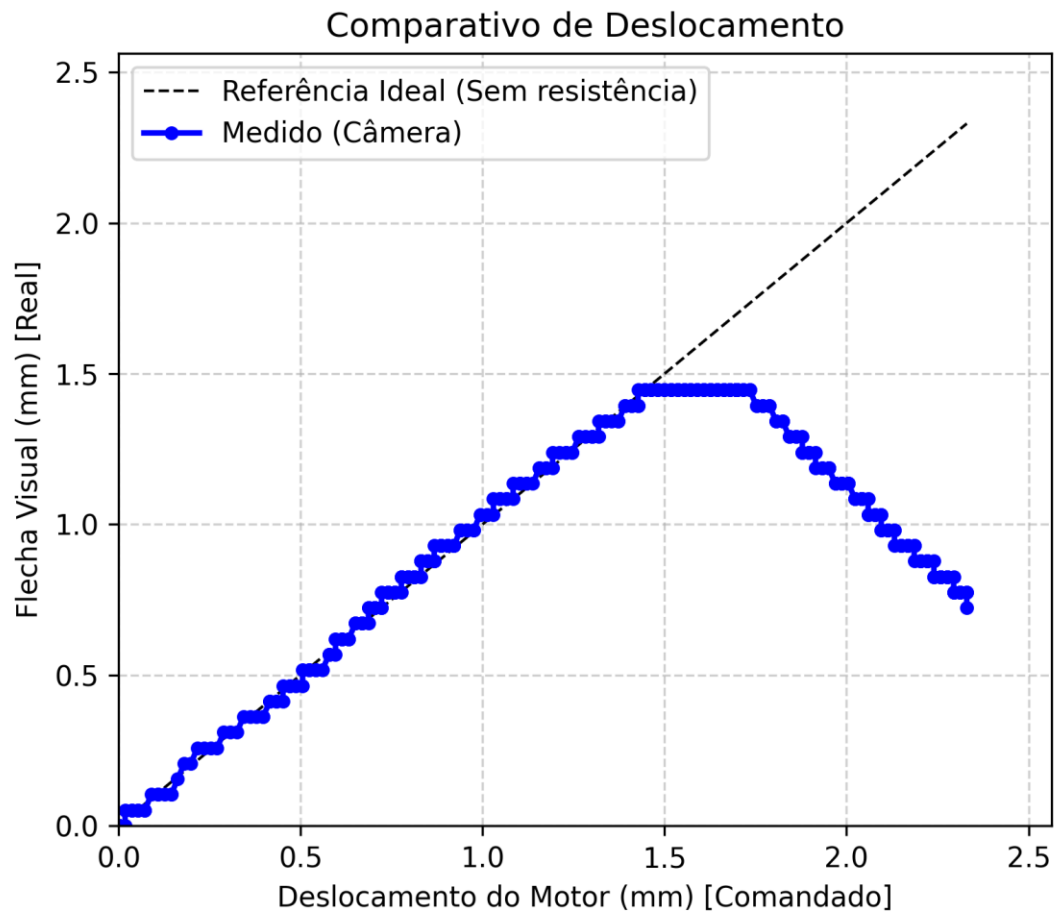
Figura B.3 – Ensaio 1 em Chapa de Latão: Determinação do limite de torque do motor.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

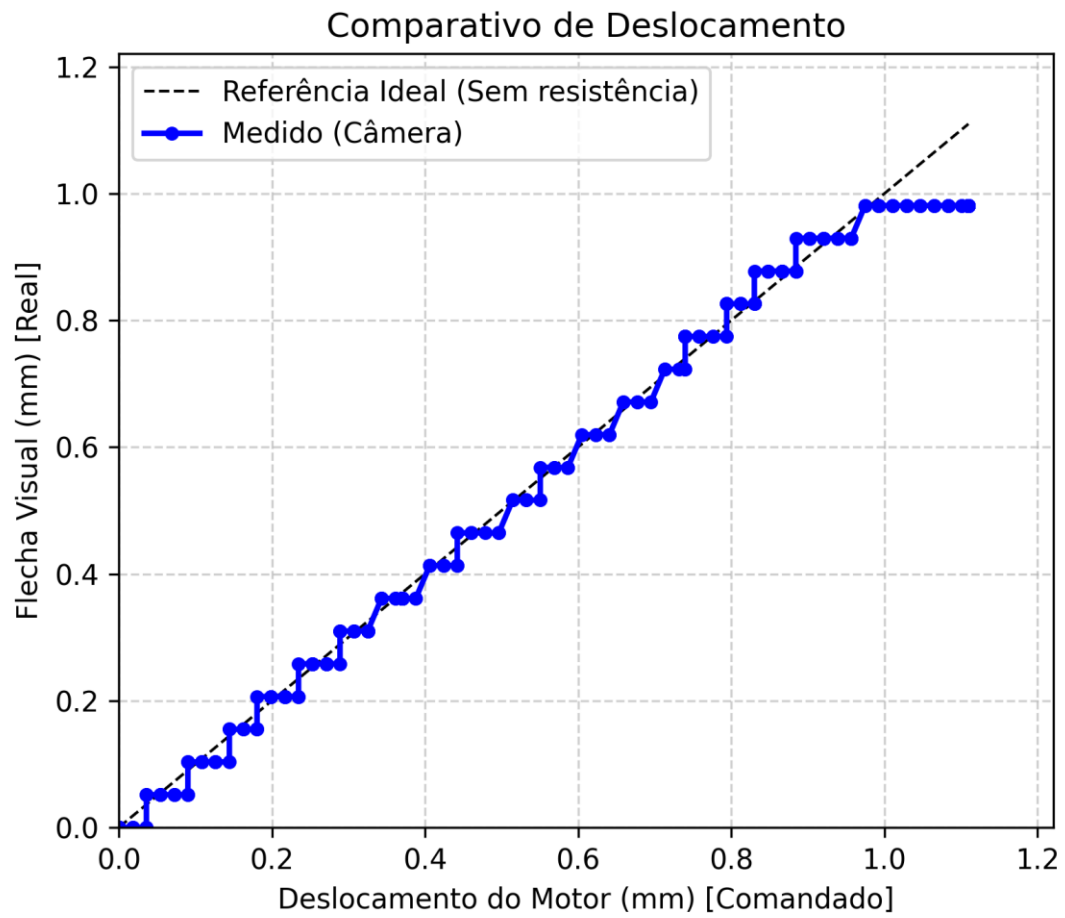
Nota: A estagnação observada (linha azul horizontal) corresponde ao travamento do motor ao atingir a tensão de 224 MPa, validando o limite de força do atuador.

Figura B.4 – Ensaio 2 em Chapa de Latão: Instabilidade de rastreamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota: A queda abrupta da curva azul enquanto a referência (tracejada) sobe evidencia a perda de referência visual devido à reflexão especular da superfície.

Figura B.5 – Ensaio 3 em Chapa de Latão: Comportamento linear sob baixa carga

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.