

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

SAMUEL CARDOSO DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE FLEXÃO MECÂNICA EM
POLÍMEROS**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

SAMUEL CARDOSO DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE FLEXÃO MECÂNICA EM
POLÍMEROS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Mecatrônico.

Orientador:
Prof. Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca do IFSC.

Silva, Samuel

Desenvolvimento de máquina de ensaio de flexão mecânica
em polímeros / Samuel Silva ; orientador, Eduardo Yuji
Sakurada, 2025.

111 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto
Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Graduação
em Engenharia mecatronica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia mecatronica. 2. Mecatrônica. 3. Projeto de
máquinas e equipamentos. 4. Ensaio mecânico. 5. Flexão.
I. Sakurada, Eduardo Yuji. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia mecatronica. III. Título.

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE FLEXÃO MECÂNICA EM POLÍMEROS

SAMUEL CARDOSO DA SILVA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 22 de agosto, 2025.

Banca Examinadora:

EDUARDO YUJI
SAKURADA:01615229981
615229981

Digitally signed by EDUARDO YUJI
SAKURADA:01615229981
DN: cn=EDUARDO YUJI
SAKURADA:01615229981, c=BR,
o=ICPEdu, ou=IFSC - Instituto Federal de
Santa Catarina, email=yuji@ifsc.edu.br
Date: 2025.08.22 20:08:36 -0300

Prof. Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
ANDRE ROBERTO DE SOUSA
Data: 24/08/2025 10:09:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng
Avaliador
Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
LUCIANO AMAURY DOS SANTOS
Data: 22/08/2025 21:34:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Luciano Amaury dos Santos, Dr. Eng
Avaliador
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha irmã Priscila, com o desejo sincero de que ela também encontre, em Deus, a coragem e a força que me sustentaram ao longo desta difícil, mas gratificante jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu Deus, que por meio de sua maravilhosa Graça e misericordioso Amor, me abençoou ao decorrer de toda minha trajetória.

Aos meus pais Luiz Carlos e Telma Magna, por todo o amor, apoio e sacrifício ao longo da minha vida. Foram vocês que me deram as bases e a oportunidade para que eu pudesse crescer e me desenvolver. Esta conquista também é de vocês.

A minha noiva Ana Clara, por ter me ajudado nos momentos de dificuldade com toda paciência, amor e carinho.

Ao meu professor e orientador, Eduardo Yuji Sakurada, pela confiança depositada no meu trabalho, pela orientação dedicada e pelo apoio constante durante todo o processo.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina e todo seu corpo docente, pelo ensino de excelência e por tornar possível a realização do meu sonho de conquistar o diploma no curso de Engenharia Mecatrônica.

A todos os meus colegas e amigos que fiz ao longo desses quase sete anos, cada um teve papel fundamental não somente nas lutas e batalhas ao decorrer do curso, como também me ajudando a ser uma pessoa melhor. Em especial, agradeço a meu grande amigo José Gualberto, que sempre esteve lado a lado comigo desde o primeiro dia de aula, em todas as matérias, trabalhos e projetos, sua amizade foi fundamental para que eu tivesse forças para concluir a jornada.

*"Não to mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes, porque o Senhor,
teu Deus, é contigo por onde quer que andares."*

— Josué 1:9

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver o projeto detalhado de uma máquina para ensaio de flexão mecânica em polímeros de baixo custo. O ensaio de flexão consiste em aplicar uma força em um corpo de prova biapoado até sua ruptura. Esse ensaio possibilita a obtenção de dados muito importantes no estudo de materiais, como por exemplo: carga máxima ($F_{\max}$), deslocamento máximo ($\delta_{\max}$), tensão de flexão (σ_f), módulo de elasticidade em flexão (E_f), deformação em flexão, entre outros. Grandes áreas de estudo, como por exemplo engenharia civil, de materiais, aeroespacial, biomédica e automobilística, utilizam esse ensaio para as mais diversas aplicações, como: avaliar a resistência e rigidez de vigas; caracterizar e comparar as propriedades mecânicas de novos materiais ou compósitos; testar materiais leves e compósitos usados em aeronaves; avaliar implantes, próteses e materiais biocompatíveis em termos de resistência e flexibilidade; ou até mesmo verificar a resistência e durabilidade de peças automotivas como chassi e suspensão. O projeto foi desenvolvido de forma a englobar uma gama de áreas estudadas durante o curso, como: mecânica dos sólidos, elementos de máquina, resistência dos materiais, metrologia, engenharia de precisão, desenho mecânico, eletrônica, programação e acionamentos elétricos, utilizando a metodologia das teorias de desenvolvimento de produto de Pahl et al(2005). Ao final do projeto, os resultados obtidos foram avaliados e discutidos, mostrando-se satisfatórios, visto que a máquina foi construída com materiais mais simples em comparação a modelos de alto nível, e mesmo assim apresentou incerteza de medição de ± 1 mm no deslocamento e $\pm 0,01$ N na carga.

Palavras-chave: Flexão, Engenharia Mecatrônica, Ensaio.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop the detailed design of a machine for mechanical flexure testing of low-cost polymers. The flexure test consists of applying a force to a simply supported specimen until it ruptures. This test allows for the collection of very important data in the study of materials, such as: maximum load ($F_{\max}$), maximum displacement ($\delta_{\max}$), flexural stress (σ_f), flexural modulus of elasticity (E_f), flexural deformation, among others. Major fields of study, such as civil, materials, aerospace, biomedical, and automotive engineering, use this test for a wide range of applications, such as: evaluating the strength and stiffness of beams; characterizing and comparing the mechanical properties of new materials or composites; testing lightweight materials and composites used in aircraft; evaluating implants, prostheses, and biocompatible materials in terms of strength and flexibility; and even verifying the strength and durability of automotive parts such as chassis and suspension. The project was developed to encompass a range of areas studied during the course, such as: solid mechanics, machine elements, material strength, metrology, precision engineering, mechanical design, electronics, programming, and electrical drives, using the product development theories methodology of Pahl et al. (2005). At the end of the project, the results obtained were evaluated and discussed, proving to be satisfactory, since the machine was built with simpler materials compared to high-level models, and even so, it presented measurement uncertainty of ± 1 mm in displacement and ± 0.01 N in load.

Keywords: Bending, Mechatronic Engineering, Testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma para desenvolvimento de projetos.	24
Figura 2 – Matriz Morfológica 01.	27
Figura 3 – Máquina um atuador.	28
Figura 4 – Máquina dois atuadores.	28
Figura 5 – Máquina um atuador + guia.	29
Figura 6 – Display OLED.	30
Figura 7 – Motor de Passo.	31
Figura 8 – Atuador hidráulico.	31
Figura 9 – Atuador pneumático.	32
Figura 10 – Nema 17 4.2kgf.cm.	32
Figura 11 – Redução 10:1.	33
Figura 12 – Suporte da redução.	33
Figura 13 – Suporte guia.	33
Figura 14 – Sistema de transformação de força.	34
Figura 15 – Estrutura da máquina parcial.	35
Figura 16 – Estrutura da máquina completa.	36
Figura 17 – Extensômetro.	36
Figura 18 – Dinamômetro.	37
Figura 19 – Célula de carga.	37
Figura 20 – Encoder.	38
Figura 21 – Régua potenciométrica.	39
Figura 22 – Fuso de esferas.	40
Figura 23 – Fuso trapezoidal.	40
Figura 24 – Apoios.	41
Figura 25 – Transpassante.	42
Figura 26 – Sensor fim de curso.	42
Figura 27 – ESP-32.	43
Figura 28 – Matriz Morfológica 02.	44
Figura 29 – DRV8825.	45
Figura 30 – HX711.	46
Figura 31 – LM2596.	47
Figura 32 – KY-040.	48
Figura 33 – Capacitor cerâmico.	49
Figura 34 – Capacitor eletrolítico.	49
Figura 35 – Case da placa 01.	54
Figura 36 – Case da placa 02.	55
Figura 37 – Suporte IHM 01.	55

Figura 38 – Suporte IHM 02.	56
Figura 39 – Esquemático ESP-32.	57
Figura 40 – Esquemático DRV8825.	58
Figura 41 – Esquemático HX711.	59
Figura 42 – Esquemático Display OLED.	59
Figura 43 – Esquemático KY-040.	60
Figura 44 – Esquemático fim de curso.	60
Figura 45 – Diagrama simplificado do código.	61
Figura 46 – Lógica do ensaio.	62
Figura 47 – Ensaio de flexão.	66
Figura 48 – Ensaio de flexão(análise de detalhes).	67
Figura 49 – Máquina para ensaio de flexão mecânica em polímeros.	68
Figura 50 – DESENHOS TÉCNICOS-01.	73
Figura 51 – DESENHOS TÉCNICOS-02.	74
Figura 52 – DESENHOS TÉCNICOS-03.	75
Figura 53 – DESENHOS TÉCNICOS-04.	76
Figura 54 – DESENHOS TÉCNICOS-05.	77
Figura 55 – DESENHOS TÉCNICOS-06.	78
Figura 56 – DESENHOS TÉCNICOS-07.	79
Figura 57 – DESENHOS TÉCNICOS-08.	80
Figura 58 – DESENHOS TÉCNICOS-09.	81
Figura 59 – DESENHOS TÉCNICOS-10.	82
Figura 60 – DESENHOS TÉCNICOS-11.	83
Figura 61 – DESENHOS TÉCNICOS-12.	84
Figura 62 – DESENHOS TÉCNICOS-13.	85
Figura 63 – Esquemático PCB.	86
Figura 64 – layout PCB.	87
Figura 65 – 3D PCB.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensão de operação dos principais componentes utilizados	56
Tabela 2 – Configuração dos pinos M0, M1 e M2 no DRV8825 para controle de microstepping	58
Tabela 3 – Custo da máquina de flexão mecânica	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
COM	<i>Communication Port</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IHM	Interface Homem Máquina
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JPG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
LAM	Laboratório de Automação da Manufatura
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MDF	<i>Medium-Density Fiberboard</i>
MOP	Laboratório de Máquinas Operatrizes
NA	Normalmente aberto
NF	Normalmente fechado
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivo Geral	17
1.3	Objetivos Específicos	17
1.4	Análise das condições práticas e factibilidade da pesquisa	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Ensaio Mecânicos e a Caracterização de Materiais	18
2.1.1	Materiais Frágeis e seu Comportamento Mecânico	18
2.2	Ensaio de Flexão: Princípios e Aplicações	18
2.3	Normas Técnicas Aplicáveis: ASTM D790 e ISO 178	19
2.3.1	ASTM D790 – <i>Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials</i>	19
2.3.2	ISO 178 – <i>Plastics – Determination of Flexural Properties</i>	20
2.3.3	Comparativo entre ASTM D790 e ISO 178	21
2.4	Desenvolvimento de Equipamentos de Ensaio	21
2.5	Estado da Arte	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Requisitos do Projeto	26
3.2	Matriz morfológica	26
3.2.1	Estrutura principal	27
3.2.2	IHM	29
3.2.3	Aplicador de força axial	31
3.2.4	Suportes	33
3.2.5	Transformação de força	34
3.2.6	Tipo de coluna	35
3.2.7	Captação de Carga	36
3.2.8	Captação de deslocamento	38
3.2.9	Tipo de fuso	39
3.2.10	Apoios	41
3.2.11	Transpassante	41
3.2.12	Sensor fim de curso	42
3.2.13	Conexão	43
3.2.14	Controlador	43
3.3	Componentes eletrônicos	44
3.3.1	DRV8825	45
3.3.2	HX711	46
3.3.3	LM2596	47
3.3.4	KY-040	48
3.3.5	Capacitores	49
4	INTEGRAÇÃO	50
4.1	Mecânica	50
4.1.1	Estrutura principal	50
4.1.2	Sistema de aplicação de carga	50
4.1.3	Case da placa e periféricos	54
4.2	Eletrônica	56

4.2.1	Alimentação	56
4.2.2	ESP-32	57
4.2.3	Motor e DRV8825	57
4.2.4	Célula de carga e HX711	58
4.2.5	Display OLED e KY-040	59
4.2.6	Sensor fim de curso	60
4.3	Software	60
4.3.1	Arduino IDE	60
4.3.2	Visual Studio	63
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	65
5.1	Custo	65
5.2	Resultados	65
5.3	Tolerâncias e precisão	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICES	72
	APÊNDICE A – ESQUEMÁTICOS	73
	APÊNDICE B – CÓDIGOS	89

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do desenvolvimento tecnológico, buscou-se estabelecer uma base sólida de conhecimento sobre as características físico-químicas dos materiais. Os avanços significativos, como os meios de transporte e dispositivos eletrônicos, foram impulsionados pelo domínio das propriedades da matéria-prima em cada aplicação. Para engenheiros, a compreensão desses fundamentos é essencial, especialmente em relação ao processamento, estrutura, propriedades e desempenho (Callister; Rethwisch, 2016).

As propriedades mecânicas são verificadas por experimentos de laboratório que simulam as condições de serviço, considerando a carga, duração e ambiente. Engenheiros de materiais focam na fabricação de materiais que atendam às exigências de serviço, o que requer o entendimento da relação entre microestrutura e propriedades mecânicas. Ensaio como o de tração são comuns para caracterizar propriedades críticas de projeto (Callister; Rethwisch, 2016).

Para analisar o comportamento estrutural dos materiais, é fundamental entender as relações entre tensões e deformações, equações de equilíbrio e condições de contorno. A mecânica da fratura, por exemplo, estuda a resposta de trincas a carregamentos, com fatores como a tenacidade à fratura (K_{Ic}) sendo cruciais para o projeto. Testes padronizados são desenvolvidos para medir essa resistência ao entalhe, mesmo que sejam de natureza mais qualitativa (Meyers; Chawla, 2009).

O estudo da mecânica dos materiais visa capacitar engenheiros a analisar e projetar máquinas e estruturas com carga, determinando tensões e deformações. A determinação das tensões não é um fim em si, mas uma ferramenta para o projeto seguro e econômico de componentes. É crucial que o material selecionado se comporte adequadamente sob carregamento, o que é validado por testes específicos em corpos de prova (al., 2017).

Historicamente, os ensaios de prova de carga evoluíram de observações empíricas antigas, como as dos egípcios, para métodos documentados no século XV por Leonardo da Vinci e Galileu Galilei. A Revolução Industrial impulsionou o desenvolvimento tecnológico desses ensaios, tornando a parametrização de processos uma prática essencial para garantia de qualidade. A evolução continua para tornar os ensaios mais precisos, rápidos e econômicos (Lacerda *et al.*, 2015).

No projeto de novas estruturas, a seleção de componentes deve assegurar funcionalidade e segurança. Incertezas na magnitude das cargas e nas propriedades dos materiais exigem a aplicação de coeficientes de segurança. Tais coeficientes protegem contra falhas imprevistas e consideram fatores como deterioração e a importância do elemento na estrutura (al., 2017).

A avaliação da resistência e tenacidade de materiais, especialmente em polímeros, pode ser desafiadora devido à sua baixa ductilidade e suscetibilidade à fratura frágil. Nesses casos, onde testes de tração podem ser limitados, ensaios de flexão transversal são uma alternativa eficaz. Embora geralmente empregados em cerâmicas, os princípios de concentração de tensão e fatores de intensidade de tensão são aplicáveis, oferecendo dados importantes para o projeto de componentes (Meyers; Chawla, 2009)(Callister; Rethwisch, 2016).

1.1 Justificativa

Uma máquina de ensaio de flexão para polímeros é fundamental para o estudo e caracterização desses materiais, dada a sua diversidade e particularidades mecânicas. Muitos polímeros, especialmente os termofixos e rígidos, apresentam baixa ductilidade e alta suscetibilidade à fratura frágil, com deformações plásticas limitadas. Nessas condições, os métodos tradicionais de ensaio, como o de tração, podem não fornecer informações completas sobre o comportamento mecânico, tornando o ensaio de flexão uma alternativa eficaz para avaliar a resistência e a tenacidade desses materiais de forma mais precisa.

O ensaio de flexão em polímeros permite a aplicação controlada de tensões e o monitoramento do material até a fratura, proporcionando uma avaliação mais precisa da resistência e do desempenho mecânico desses materiais. Isso é especialmente importante porque os polímeros, apesar de flexíveis, podem apresentar falhas que requerem uma análise detalhada para garantir sua segurança em aplicações práticas.

A tenacidade, ou seja, a capacidade do polímero resistir à propagação de trincas, é uma característica essencial que pode ser avaliada através do ensaio de flexão. Essa análise fornece informações críticas para o uso seguro dos polímeros, especialmente em aplicações onde carga e deslocamento máximos são determinantes para o desempenho do componente.

Em setores como a indústria automotiva, eletroeletrônica e embalagens, onde os polímeros são amplamente utilizados, a confiabilidade dos materiais depende da precisão dos ensaios realizados. Uma máquina de ensaio de flexão projetada para polímeros é capaz de oferecer testes normatizados, que asseguram resultados reprodutíveis e alinhados às exigências internacionais.

Além disso, na pesquisa e desenvolvimento, essa máquina é uma ferramenta indispensável para otimizar as propriedades mecânicas dos polímeros, permitindo o desenvolvimento de materiais com melhor desempenho, maior durabilidade e segurança, como por exemplo servir para testar materiais impressos em filamentos plásticos como PLA e ABS, algo muito comum nos dias de hoje.

Portanto, a importância de uma máquina de ensaio de flexão dedicada

a polímeros está na sua capacidade de fornecer uma avaliação precisa, segura e padronizada desses materiais, o que é essencial para garantir sua aplicação confiável em diversas indústrias e para fomentar a inovação tecnológica no campo dos polímeros.

1.2 Objetivo Geral

Para esse trabalho tem-se como objetivo principal desenvolver o projeto detalhado de uma máquina de teste para ensaio de flexão mecânica em polímeros (como ABS, poliestireno e acrílico) que tenha custo competitivo.

1.3 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos temos as etapas mais detalhadas do projeto que são:

- a) Revisão bibliográfica de literatura relacionada às máquinas de ensaio de flexão;
- b) Analisar as máquinas de ensaio da atualidade e produtos similares;
- c) Revisar a metodologia de projeto de produtos Pahl et al;
- d) Desenvolver o projeto informacional para levantamento dos requisitos do produto;
- e) Desenvolver o projeto conceitual da máquina de ensaio;
- f) Desenvolver o projeto detalhado da máquina de ensaio;
- g) Avaliar o projeto e propor melhorias.

1.4 Análise das condições práticas e factibilidade da pesquisa

O trabalho que será desenvolvido visa contemplar a fabricação do equipamento final, em forma de protótipo. Os principais recursos necessários para criação do projeto são ferramentas de software como *SolidWorks*, *Visual Studio* e *Arduino IDE*. O tempo disponível para o desenvolvimento desse projeto foi de 20 horas semanais, durante um período de cinco meses. Foram necessários conhecimentos nas áreas de mecânica dos sólidos, elementos de máquina, resistência dos materiais, metrologia, engenharia de precisão, desenho mecânico, eletrônica, programação, acionamentos elétricos e desenvolvimento de produto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ensaios Mecânicos e a Caracterização de Materiais

Os ensaios mecânicos são ferramentas fundamentais para a caracterização dos materiais e a previsão do seu comportamento sob diferentes tipos de carregamento. Entre os principais tipos de ensaios mecânicos, destacam-se: tração, compressão, flexão, torção, dureza e fadiga. Esses ensaios têm como objetivo avaliar propriedades como resistência, ductilidade, rigidez, tenacidade e módulo de elasticidade (Callister; Rethwisch, 2016).

A escolha do tipo de ensaio depende diretamente do comportamento esperado do material e das condições em que ele será aplicado. No caso de materiais frágeis, como cerâmicas e alguns polímeros, o ensaio de flexão se destaca por permitir uma análise mais controlada e representativa de sua resistência mecânica.

2.1.1 Materiais Frágeis e seu Comportamento Mecânico

Materiais frágeis são definidos por sua baixa ductilidade e capacidade limitada de deformação plástica antes da fratura. Entre os exemplos mais comuns estão as cerâmicas técnicas, os vidros, os compósitos de matriz cerâmica e certos polímeros termoendurecíveis. A fratura nesses materiais geralmente ocorre sem aviso prévio, sendo altamente sensível a defeitos internos, como trincas e inclusões (Meyers; Chawla, 2009).

A caracterização precisa desses materiais exige métodos de ensaio específicos que levem em consideração sua suscetibilidade à fratura frágil. Nesses casos, os ensaios de tração se mostram inadequados, pois introduzem concentrações de tensão nos pontos de fixação, levando à fratura prematura. O ensaio de flexão, em contrapartida, distribui melhor a tensão e permite observar a resposta do material até o colapso (Meyers; Chawla, 2009).

2.2 Ensaio de Flexão: Princípios e Aplicações

O ensaio de flexão consiste em aplicar uma força perpendicular a um corpo de prova apoiado em dois pontos, provocando uma curvatura até a ruptura. Existem dois principais tipos: flexão em três pontos e flexão em quatro pontos. A escolha entre eles depende da norma de referência e do tipo de material analisado.

No caso da flexão em três pontos, como descrito nas normas ASTM D790 e ISO 178, o corpo de prova é apoiado nas extremidades e a carga é aplicada no centro. Este método é amplamente utilizado para materiais frágeis, pois minimiza as tensões de fixação e permite uma distribuição mais uniforme das tensões de tração e

compressão ao longo do corpo de prova (ASTM... , 2022)(ISO... , 2019).

A tensão máxima de flexão (MPa), ou módulo de ruptura, pode ser determinada pela fórmula:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (1)$$

Onde:

- F é a carga aplicada na fratura (N);
- L é o vão entre os apoios (mm);
- b é a largura do corpo de prova (mm);
- d é a espessura do corpo de prova (mm).

Este tipo de ensaio permite ainda a obtenção de parâmetros como o módulo de elasticidade em flexão, deformação na fratura e o comportamento pós-pico, quando aplicável.

2.3 Normas Técnicas Aplicáveis: ASTM D790 e ISO 178

A ASTM D790 e a ISO 178 são as normas técnicas mais utilizadas internacionalmente para caracterizar o comportamento à flexão de materiais plásticos e frágeis. Ambas fornecem diretrizes claras quanto à geometria dos corpos de prova, velocidade de ensaio, espaçamento entre apoios e condições ambientais.

Essas normas são fundamentais para garantir a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados obtidos entre diferentes laboratórios e aplicações industriais. A escolha entre uma ou outra depende da localização geográfica, do tipo de material e dos requisitos técnicos do cliente ou regulamento (ASTM... , 2022)(ISO... , 2019).

2.3.1 ASTM D790 – *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*

A ASTM D790 estabelece métodos para medir propriedades de flexão em materiais plásticos, incluindo os reforçados com fibras. O corpo de prova é apoiado em duas extremidades e a carga é aplicada centralmente até a ruptura ou até atingir uma deformação específica.

- **Dimensões típicas do corpo de prova:** $127 \times 12,7 \times 3,2$ mm.
- **Vão entre apoios:** $L = 16d$ (sendo d a espessura do corpo de prova).

- **Velocidade de ensaio (R):**

$$R = \frac{Z \cdot L^2}{6 \cdot d}$$

onde:

- R é a velocidade da cabeça de carga (mm/min),
- Z é uma constante recomendada pela norma (comum: 0,01 mm/min/mm),
- L é o vão entre apoios (mm),
- d é a espessura do corpo de prova (mm).

Geralmente apresenta valores entre 1,3 mm/min e 13 mm/min.

- **Medição do deslocamento:** O deslocamento (δ) é obtido pelo movimento da cabeça de carga da máquina.

- **Fórmula da deformação:**

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot \delta \cdot d}{L^2}$$

- **Padrão de deformação:** O ensaio é conduzido até a ruptura ou até atingir **5% de deformação**, o que ocorrer primeiro.

2.3.2 ISO 178 – *Plastics – Determination of Flexural Properties*

A ISO 178 estabelece diretrizes similares, com pequenas diferenças nos critérios de medição, dimensões e cálculo de parâmetros. Essa norma é amplamente utilizada na Europa e em países que seguem os padrões ISO.

- **Dimensões típicas do corpo de prova:** $80 \times 10 \times 4$ mm.
- **Vão entre apoios:** $L = 16d$, com variações entre $14d$ e $20d$ permitidas.
- **Velocidade de ensaio (v):**

$$v = \frac{r \cdot L^2}{6 \cdot h}$$

onde:

- v é a velocidade da cabeça de carga (mm/min),
- r é a taxa de deformação (usualmente 0,01 ou $0,1 \text{ min}^{-1}$),
- L é o vão entre apoios (mm),
- h é a espessura do corpo de prova (mm).

A seleção da taxa de deformação r depende do tipo de material: para materiais **rígidos**, utiliza-se tipicamente $r = 0,01 \text{ min}^{-1}$; para **materiais flexíveis**, recomenda-se $r = 0,1 \text{ min}^{-1}$. Se aplicarmos os valores em um corpo de prova padrão da norma, obteremos os valores de 2 mm/min para rígidos e 10 mm/min para flexíveis.

- **Medição do deslocamento:** O deslocamento (s) é preferencialmente medido diretamente no corpo de prova, por meio de LVDTs ou dispositivos ópticos.

- **Fórmula da deformação:**

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2}$$

- **Padrão de deformação:** A norma define a medição da tensão e do módulo até **3% ou 5% de deformação**, conforme o material e a aplicação.

2.3.3 Comparativo entre ASTM D790 e ISO 178

- **Dimensões dos corpos de prova:** A ISO utiliza corpos mais curtos e estreitos; a ASTM permite corpos maiores, adaptáveis a plásticos reforçados.
- **Velocidade de ensaio:** Ambas utilizam fórmulas semelhantes, com pequenas diferenças nas variáveis e unidades.
- **Deslocamento:** A ASTM mede a movimentação da cabeça de carga, enquanto a ISO prefere a medição direta no corpo de prova, o que tende a ser mais preciso.
- **Deformação-padrão:** ASTM considera 5% como limite principal; ISO adota 3% para cálculo do módulo e 5% para tensão de flexão.
- **Aplicação geográfica:** ASTM é predominante na América do Norte; ISO é amplamente aceita internacionalmente.

2.4 Desenvolvimento de Equipamentos de Ensaio

A construção de máquinas de ensaio mecânico, especialmente para materiais frágeis, exige o domínio de conhecimentos multidisciplinares, como mecânica dos sólidos, instrumentação, automação e eletrônica. O projeto deve contemplar desde a estrutura mecânica resistente à flexão até a medição precisa da força e deslocamento.

Diversas abordagens têm sido utilizadas na fabricação de máquinas de ensaio de baixo custo, especialmente em instituições acadêmicas e centros de pesquisa. O uso de sistemas embarcados, como microcontroladores ESP-32, drivers para motores de passo e sensores de força como células de carga com amplificadores HX711,

permite o desenvolvimento de equipamentos funcionais a custo acessível, mantendo a confiabilidade dos dados.

A aplicação de metodologias de projeto, como as de Pahl e Beitz, também contribui para o desenvolvimento sistemático do equipamento, desde o levantamento de requisitos até a avaliação do desempenho final. Essa abordagem sistemática aumenta a eficiência do processo de desenvolvimento e garante que o equipamento atenda às normas e às necessidades reais do usuário (Pahl *et al.*, 2005).

2.5 Estado da Arte

A caracterização de materiais poliméricos através de ensaios mecânicos é fundamental para diversas aplicações em engenharia, garantindo a seleção, o projeto e a segurança de componentes. Entre os diversos ensaios, a flexão mecânica é crucial para determinar propriedades como resistência e módulo de flexão. Tradicionalmente, equipamentos de ensaio de materiais são de alto custo, o que representa um desafio significativo para universidades e instituições de pesquisa, especialmente em cenários de restrição orçamentária.

Nesse contexto, o estado da arte tem sido marcado por uma crescente busca pelo desenvolvimento de máquinas de ensaio de baixo custo e/ou de conceito *open-source*, visando democratizar o acesso à experimentação e à pesquisa em mecânica dos materiais.

Diversos trabalhos têm focado na concepção e construção de equipamentos que utilizam materiais reutilizados, componentes de baixo custo e manufatura aditiva (impressão 3D). Um exemplo é o desenvolvimento de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa, que se utilizou de uma base de metroscópio horizontal universal, tubos de PVC e chapas de MDF, além de componentes impressos em 3D, para contornar a dificuldade de aquisição de equipamentos específicos por parte das universidades (Silveira; Clara, 2024). Essa abordagem demonstra a viabilidade de construir máquinas funcionais a partir de recursos limitados, mantendo a capacidade de realizar ensaios padronizados. Outro estudo (Lages *et al.*, 2019) também detalha a concepção e construção de uma máquina para ensaio de fadiga por flexão, focando na importância das propriedades mecânicas e apresentando um sistema inovador para variação da tensão aplicada, simplificando o processo em comparação com máquinas comerciais.

A automação e a precisão na aquisição de dados são pontos-chave no desenvolvimento de máquinas de ensaio. A plataforma Arduino surge como uma solução robusta e de baixo custo para controle e coleta de dados, sendo empregada para monitorar parâmetros de ensaio, como a contagem de ciclos em ensaios de fadiga (Silveira; Clara, 2024). Além disso, o Arduino é amplamente utilizado no desenvolvimento

de metodologias experimentais para o ensino, incluindo ensaios de flexão, tração e monitoramento de estruturas, facilitando a validação experimental de conceitos teóricos (Freitas *et al.*, 2022).

Máquinas universais de ensaios mais abrangentes também são desenvolvidas sob essa ótica, como uma máquina portátil didática de baixo custo com filosofia *open-source* capaz de aplicar cargas de até 10 kN em tração e compressão (Nakazato, 2019). Este equipamento, controlado por uma placa Arduino UNO, utiliza fusos trapezoidais para aplicação de carga e codificadores de quadratura para aquisição de deslocamento e velocidade, podendo ser adaptado para ensaios de flexão e dobramento. A flexibilidade de adaptação é uma característica importante desses projetos, permitindo que uma mesma plataforma seja utilizada para diferentes configurações de teste.

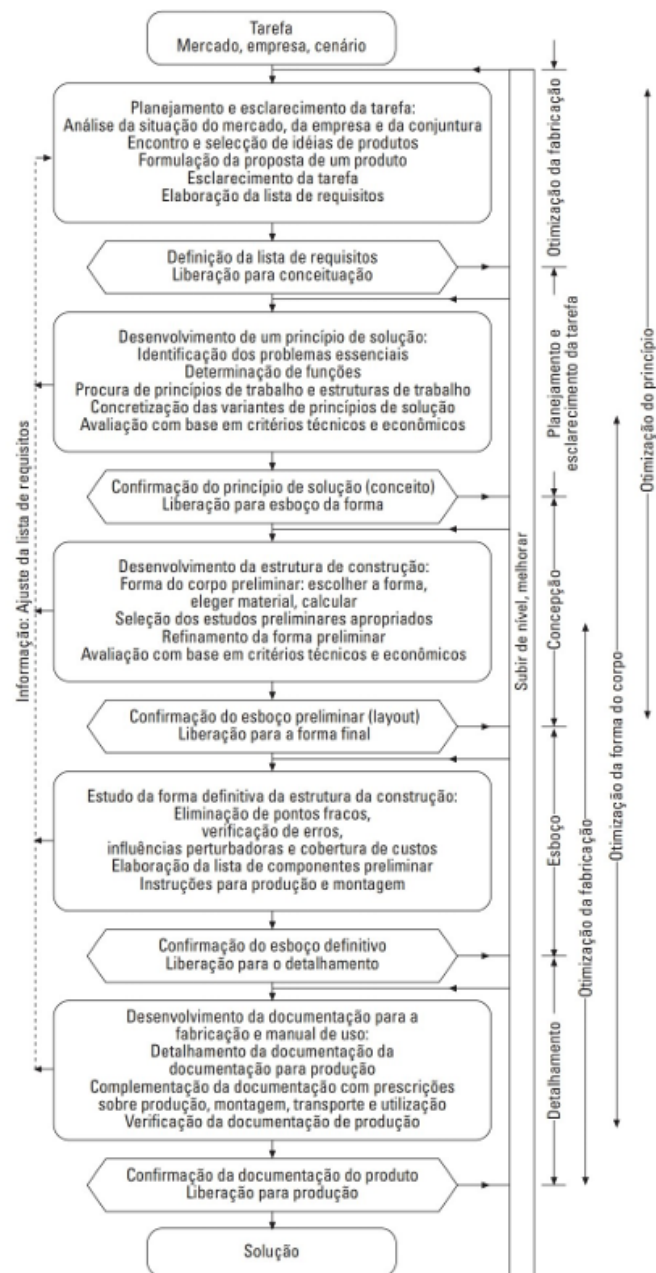
A validação de equipamentos construídos com essas abordagens é crucial para atestar sua confiabilidade. Testes preliminares e comparações com máquinas comerciais demonstram que, mesmo com custos reduzidos, é possível obter dados satisfatórios para fins didáticos e até mesmo para uso em pesquisa (Nakazato, 2019). A calibração da célula de carga e a análise de sua estabilidade, por exemplo, mostram que comportamentos estritamente lineares e histereses muito pequenas podem ser alcançadas, indicando a capacidade de gerar dados úteis. Projetos *open-source* se destacam ao disponibilizar desenhos, detalhes construtivos, circuitos eletrônicos e códigos de programação, incentivando a reprodução e a evolução contínua dos equipamentos sob licenças como *Creative Commons* (Nakazato, 2019).

O panorama atual do estado da arte em máquinas para ensaios mecânicos em polímeros reflete uma forte tendência para a inovação em termos de acessibilidade e sustentabilidade. A capacidade de desenvolver e construir equipamentos confiáveis e de baixo custo, utilizando tecnologias como Arduino e impressão 3D, e promovendo a filosofia *open-source*, é um avanço significativo que permite aprofundar estudos sobre as propriedades mecânicas dos materiais, incluindo a flexão, mesmo em ambientes com recursos limitados.

3 METODOLOGIA

No desenvolvimento desse trabalho, foi essencial adotar uma metodologia que permitisse um desenvolvimento eficiente e preciso, para otimizar ao máximo o tempo necessário para sua conclusão. A base metodológica foi a de Pahl et al. (2005), conhecida por sua abordagem estruturada e prática para a solução de problemas de engenharia, permitindo um progresso claro e organizado. A seguir podemos observar os passos para o desenvolvimento de um produto segundo o seu método metodológico.

Figura 1 – Fluxograma para desenvolvimento de projetos.



Fonte: Pahl et al. (2005).

Para complementar essa metodologia, foram incorporadas as contribuições de Norton R. L. (2013) e Carpes Jr (2014). Norton oferece orientações práticas sobre design de máquinas, destacando a importância de soluções simples e aplicáveis. Já Carpes Jr traz uma visão voltada para inovação e adaptabilidade, essenciais para a execução rápida e eficaz de projetos. As fases para execução de um projeto com base em Norton são apresentadas abaixo:

- Identificação da necessidade;
- Pesquisa de suporte;
- Definição dos objetivos;
- Especificações de tarefas;
- Síntese;
- Análise;
- Seleção;
- Projeto detalhado;
- Protótipo de teste;
- Produção.

Devido ao fato de estarmos projetando uma máquina que tem como seu objetivo a validação da ideia e também ao pouco tempo de desenvolvimento disponível, não será possível seguir com rigor todas as fases apresentadas no fluxograma de Pahl, dessa forma, unindo as orientações do mesmo em conjunto com o fluxo de soluções de Norton, seguiremos as fases de projeto adaptadas, apresentadas a seguir:

- Estudo da factibilidade e normas envolvidas;
- Requisitos do projeto;
- Matriz morfológica;
- Análise e seleção de componentes;
- Integração;
- Projeto detalhado;
- Testes;

- Análise dos resultados.

Essa combinação de abordagens permitirá que o trabalho seja conduzido de maneira eficiente, focando em resultados de qualidade dentro do tempo disponível.

3.1 Requisitos do Projeto

Para fabricarmos a máquina precisamos definir os requisitos necessários. Uma máquina de flexão deve ter a capacidade de aplicar força o suficiente para romper o corpo de prova ensaiado, como também armazenar os dados adquiridos de alguma forma para estudo posterior.

Utilizando o ABS como base para servir de material do corpo de prova, temos demonstrado no tópico 4.1.2 que um pouco mais de 100 N são suficientes para romper com o mesmo, dessa forma, a máquina precisa ter como atuador, algum componente que consiga gerar essa carga.

Também como comentado precisa ter algum método de adquirir e armazenar os dados do teste como carga e deslocamento que o corpo de prova sofre ao decorrer do ensaio. Deve apresentar estrutura robusta que resista a carga aplicada pelo atuador sem sofrer grandes esforços.

Por fim deve permitir ao usuário o acompanhamento do teste em tempo real, como também algum método de seleção ou configuração pré-ensaio, e ser de baixo custo.

Sendo assim temos como requisitos do projeto os seguintes pontos:

- Suportar a aplicação de, no mínimo, 100 N de força sem falhas estruturais;
- Estrutura deve ser robusta a fim de minimizar deformações próprias durante o ensaio;
- Acomodar corpos de prova com dimensões compatíveis com a norma ASTM D790 e ISO 178;
- Monitorar em tempo real a carga aplicada e o deslocamento sofrido;
- Conter uma interface de usuário que permita selecionar parâmetros e coordenar o ensaio;
- Ser de baixo custo, com uso de componentes acessíveis.

3.2 Matriz morfológica

Seguindo a proposta de metodologia e os requisitos citados acima, desenvolveu-se uma matriz morfológica para se chegar a uma solução final para a escolha de

técnicas e tecnologias que serão aplicadas para a construção da máquina. A Figura 2 representa o processo:

Figura 2 – Matriz Morfológica 01.

Função	Popostas de solução		
Estrutura principal	Somente um atuador	Dois atuadores	Um atuador + guia linear
IHM	Display na máquina	Interface no computador	Display na máquina + interface computador
Aplicador de força axial	Motor de passo	Atuador hidráulico	Atuador pneumático
Suportes	Usinado em aço	Impresso em filamento plástico	Usinado em poliacetal
Transformação de força	Guia linear	Via perfil de alumínio	
Tipo de coluna	Usinada	Perfil de alumínio	Chapa metálica
Captação de carga	Célula de carga	Dinamômetro	Extensômetro
Captação de deslocamento	Encoder	Passos do fuso	Régua potenciometrica
Tipo de fuso	Fuso de esferas	Fuso trapezoidal	Fuso de avanço
Apoios	Usinado em aço	Impresso em filamento plástico	Usinado em poliacetal
Transpassante	Usinado em aço	Impresso em filamento plástico	Usinado em poliacetal
Sensor fim de curso	Sensor indutivo	Sensor mecânico	Sensor mecânico + software
Conexão	Wi-Fi	Bluetooth	Serial
Controlador	Raspberry PI	ESP-32	Arduino

Fonte: Autor.

A seguir, pontuar-se-á sobre as escolhas de cada tópico.

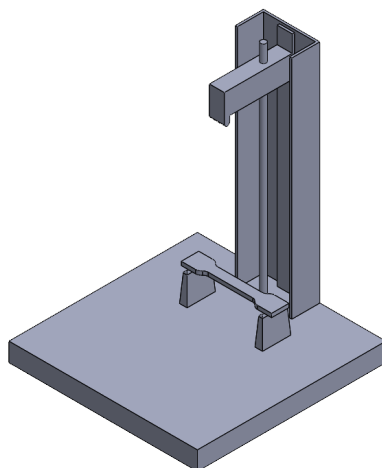
3.2.1 Estrutura principal

Para desenvolver a máquina, foram estudadas três formas de estruturação, utilizando somente um atuador, dois atuadores ou um atuador em conjunto com uma guia linear.

Utilizar somente um atuador faz com que o sistema sofra mais ação de forças que não atuam diretamente no ensaio, como o momento gerado pelo braço de alavanca entre o fuso e o conjunto de transferência da castanha. Porém, é muito mais

acessível pois conta com a utilização de apenas um atuador. Para atenuar a influência das forças derivadas, pode-se utilizar uma guia linear ou algum tipo de sistema de transmissão de forças, assim como também tentar diminuir ao máximo o comprimento do suporte para diminuir o momento fletor.

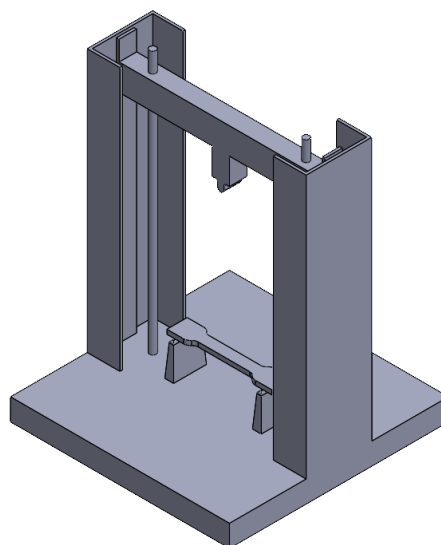
Figura 3 – Máquina um atuador.



Fonte: Autor.

Utilizar dois atuadores tem a vantagem de centralizar o transpassante, fazendo com que o mesmo não sofra com grandes problemas no que diz respeito à influência de forças derivadas, já que o mesmo se encontrará exatamente no meio entre os dois atuadores. Outra vantagem é o fato de se ter o dobro de força aplicada. Todavia ao se utilizar dois atuadores podemos sofrer com dessincronização dos avanços, sem contar o fato que o preço é dobrado, encarecendo o projeto.

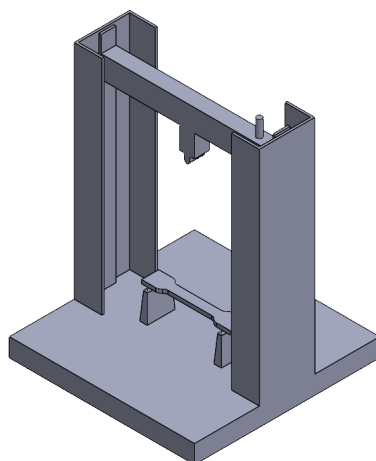
Figura 4 – Máquina dois atuadores.



Fonte: Autor.

Utilizar um atuador em conjunto com uma guia linear, nos traz a vantagem de poder centralizar o transpassante assim como na opção anterior, porém cria-se um braço de alavanca horizontal, já que em um dos lados estará fixado apenas pela guia. O momento também será maior que no primeiro caso, pois a distância necessária para se ter o corpo de prova no centro deve ser respeitada.

Figura 5 – Máquina um atuador + guia.



Fonte: Autor.

Sendo assim, optou-se pela primeira opção, já que se mostrou mais acessível, e eficaz se controlada a questão das forças derivadas.

3.2.2 IHM

Para a Interface Homem Máquina(IHM), pensou-se em algumas opções, que serão abordadas a seguir.

Utilizar um display na máquina, garante praticidade, já que tudo que o operador precisa estará ao seu alcance. A maioria das máquinas hoje em dia possuem displays integrados que permitem o acompanhamento dos testes e manipulação das variáveis. Contudo ter um display que permita a visualização do gráfico sendo gerado faz com que o projeto encareça, dado que displays dessa magnitude tendem a ser bem mais caros.

Pensar na opção de utilizar somente uma interface no computador é algo que a princípio parece extremamente viável. Sabe-se que com as várias linguagens de programação existentes no mercado hoje, o que não falta são opções para se desenvolver interfaces extremamente polidas que permitem fazer de tudo. E o fato de ser no computador auxilia e facilita a implementação, pois podemos utilizar a capacidade de processamento do mesmo para realizar todas as tarefas e também conectar a interface a internet. Entretanto ter a interface somente no computador faz

com que o usuário fique dependente do mesmo, podendo apenas utilizar a máquina quando tiver um próximo. Isso limita bastante o operador no manuseio.

Ter um display na máquina e também uma interface no computador, pode parecer algo redundante, porém se implementado de forma correta, faz com que o projeto fique muito mais robusto. A ideia consiste em oferecer ao usuário, todas as informações necessárias para a configuração e realização dos testes via display na própria máquina, e fornecer o acesso aos dados durante o teste via interface no computador. Isso auxilia na capacidade de processamento do controlador da máquina e potencializa a obtenção dos dados do teste, já que todos já estarão salvos no computador, podendo ser pós processados em uma gama de outros softwares como Matlab, Octave, RStudio, entre outros.

Dessa forma, optou-se por seguir com a terceira opção, para garantir a robustez necessária para a máquina. Para o display foi escolhido um modelo OLED que consta na Figura 6:

Figura 6 – Display OLED.



Fonte: Soldered.

E para a interface gráfica no computador, utilizou-se do software VisualStudio em conjunto com implementações em python para se criar uma interface que permitisse o acompanhamento em tempo real da geração do gráfico, como também salvar os dados em formato jpg. ou csv.

3.2.3 Aplicador de força axial

Para aplicar a força necessária para realização dos ensaios, pensou-se em algumas possibilidades como, motor de passo, atuador hidráulico e atuador pneumático.

A utilização de um motor de passo a princípio já se mostra uma grande possibilidade, dado ao fácil manuseio e configuração, possibilidade de lidar com altas cargas a depender de seu torque, capacidade de trabalhar em baixas velocidades por meio de configuração de passos em microstepping e baixo consumo energético. Pontos negativos podem ser a perda de passo ou falhas elétricas.

Figura 7 – Motor de Passo.



Fonte: Rizon.

Os atuadores hidráulicos e pneumáticos têm seu lugar no desenvolvimento de máquinas a muito tempo consolidados devido a sua alta compatibilidade e capacidade de aplicação de força. São versáteis e conseguem ser aplicados em uma variedade de projetos. Porém, utilizar-se de atuadores desse calibre em um projeto de uma máquina de ensaio de flexão não seria tão viável dado ao sistema que se faz necessário para sua utilização. Compressores e bombas encareceriam o projeto e dificultariam a aplicação nesse caso.

Figura 8 – Atuador hidráulico.



Fonte: Romaq Máquinas.

Figura 9 – Atuador pneumático.

Fonte: Festo.

Sendo assim, a melhor abordagem se dá pela utilização do motor de passo. Vale ressaltar que para o ensaio em polímeros, a carga aplicada não precisa ser tão alta dado a sua fragilidade, principalmente numa máquina que tem por seu objetivo a validação da ideia. Dessa forma optou-se por utilizar um motor de passo NEMA 17 com 4,2 kgf.cm de força. Essa escolha nos ajuda a baixar o preço total da máquina, todavia somente o motor não será suficiente para aplicar a carga necessária no corpo de prova, dessa forma, também se fez necessário a utilização de uma redução de engrenagens 10:1, para potencializar o torque e garantir que o ensaio consiga ser realizado. Poderia-se muito bem adquirir um motor de passo com torque maior, porém a solução citada anteriormente foi a que mais reduziu o custo total da máquina, como esse é um pré requisito de suma importância, seguiu-se dessa forma.

Figura 10 – Nema 17 4.2kgf.cm.

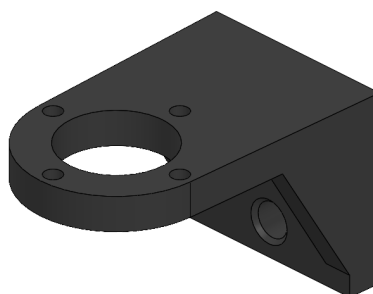
Fonte: Piscealed.

Figura 11 – Redução 10:1.

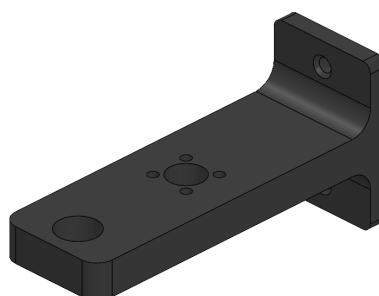
Fonte: HLTNC.

3.2.4 Suportes

Se fez necessário a criação de dois suportes, um para acoplar a montagem do conjunto motor/redução, e o outro para servir de engate para a castanha, como também fixar na célula de carga e no perfil de alumínio.

Figura 12 – Suporte da redução.

Fonte: Autor.

Figura 13 – Suporte guia.

Fonte: Autor.

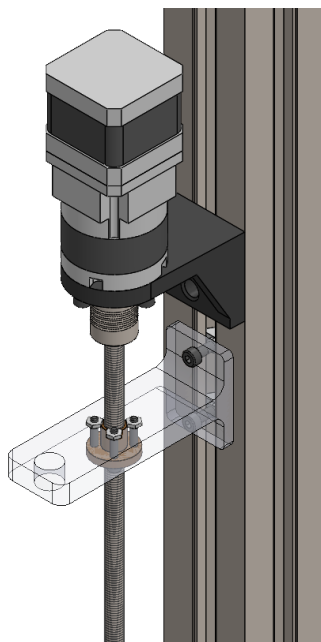
O primeiro suporte pode ser impresso em 3D com filamento em ABS, pois somente irá sustentar o motor, que terá praticamente todo seu peso distribuído no fuso e base.

Já o segundo, irá absorver boa parte da força aplicada pois cria um braço de alavanca entre a castanha e a ponta do transpassante. Dessa forma precisa-se ser usinado em aço para garantir maior resistência a possíveis esforços sofridos.

3.2.5 Transformação de força

Esse tópico visa por analisar qual seria o método mais adequado para auxiliar na transmissão e condução da força ao decorrer do deslocamento. É fato que nas máquinas atuais as guias lineares tomam a liderança por serem altamente confiáveis. Não dá pra negar o fato de serem praticamente imprescindíveis no que diz respeito a utilização em sistemas de movimento. Tem-se porém o fato de estarmos fabricando uma máquina protótipo, o tempo e preço necessários para se ter uma guia usinada no tamanho correto pode ser alto. Dessa forma, aproveitando-se da geometria da coluna de apoio, utilizou-se perfil de alumínio para guiar o movimento vertical da castanha ao decorrer do fuso.

Figura 14 – Sistema de transformação de força.



Fonte: Autor.

Essa é uma solução prática e bastante utilizada em máquinas mais simples. Apesar de saber que não seria a melhor, em se tratando de precisão, a solução nos atenderá para poder analisar os primeiros resultados da máquina.

Porém, é válido ressaltar que uma vez validada a máquina, a ideia seria partir para a utilização da guia linear que garantirá com certeza muito mais precisão e confiabilidade nos resultados, auxiliando drasticamente na transmissão da força gerada pelo motor.

3.2.6 Tipo de coluna

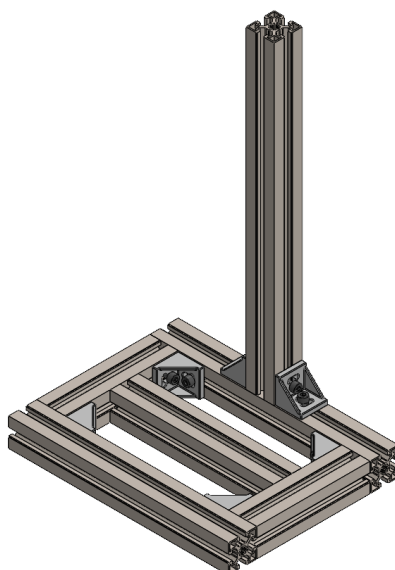
Para dar sustentação ao conjunto que aplicará a força, precisou-se pensar em como construir a coluna principal, já que seguiu-se com a ideia de somente um atuador, teremos uma coluna vertical centralizada, onde serão montados os componentes.

Foram analisadas algumas possibilidades, como por exemplo uma coluna usinada em aço, um perfil de alumínio, ou até mesmo em chapa metálica.

A ideia de coluna usinada garantiria mais resistência e robustez ao conjunto, porém se mostra muito cara, dessa forma inviável. A chapa metálica é uma ótima saída, e amplamente utilizada na indústria de fabricação de máquinas de ensaio hoje em dia, porém devido ao tempo de fabricação das mesmas, não será viável a sua aplicação.

Já o perfil em alumínio garante uma boa sustentação e permite que utilizemos de sua geometria para conectar outros componentes, além de ser mais acessível. Dessa forma preferiu-se por utilizar perfil de alumínio, não somente para centralizar a montagem dos componentes, mas também para compor a estrutura total da máquina como mostrado na Figura 15,

Figura 15 – Estrutura da máquina parcial.

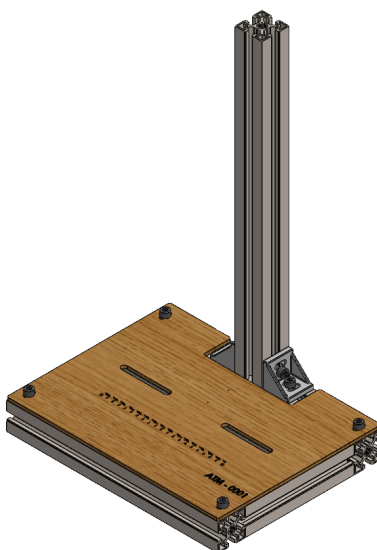


Fonte: Autor.

Os perfis têm tamanho 500, 350, 260 e 180 mm. Foram todos encontrados e trabalhados dentro do IFSC. Para servir de apoio, utilizou-se uma chapa de compensado

de 5 mm (apresentado na Figura 16), onde serão acoplados mais componentes.

Figura 16 – Estrutura da máquina completa.



Fonte: Autor.

3.2.7 Captação de Carga

Captar a carga que está sendo aplicada desde o início do teste até sua finalização é um passo crucial do desenvolvimento deste trabalho. Em se tratando de máquinas de ensaio de flexão mecânica, o que se tem no mercado hoje é a ampla utilização de células de carga, às vezes até em conjunto com extensômetros(Figura 17). São componentes altamente difundidos e utilizados, que passam confiança e credibilidade aos ensaios. Já o dinamômetro(Figura 18) também é utilizado para medir a aplicação de cargas, porém a sua aplicação em uma máquina desse calibre não se faz possível devido à baixa compatibilidade.

Figura 17 – Extensômetro.



Fonte: SciELO Brasil.

Figura 18 – Dinamômetro.

Fonte: Gama Instruments.

Sendo assim, optou-se por utilizar da célula de carga como sensor que captará os dados de carga aplicada ao decorrer do teste, pois a mesma garante boa leitura, é robusta e de fácil implementação. A utilização de extensômetros acoplados por enquanto não se faz necessária, já que estamos tratando ainda de uma máquina protótipo. Normalmente esse tipo de componente é utilizado para medir com precisão a deformação da face acoplada nos ensaios de flexão, porém como já mencionado a célula de carga aplicada na máquina já se faz satisfatória.

Foi utilizado o modelo PSD-S1 *S-beam* (Figura 19) que suporta uma carga de até 50kgf. É importante salientar que a célula por si só gera um sinal muito baixo, ficando dependente de um driver que amplifique seu sinal.

Figura 19 – Célula de carga.

Fonte: Probots.

3.2.8 Captação de deslocamento

O deslocamento por sua vez também é outra variável imprescindível para a realização do ensaio. Erros na sua medição podem fazer com que o ensaio perca credibilidade. Para colher esta medição existem algumas opções, como *encoder*, régua potenciométrica ou se basear nos passos do fuso.

O *encoder* (ou codificador rotativo) apresentado na Figura 20, é um dispositivo eletromecânico que converte movimento rotacional (ou linear) em sinais elétricos, permitindo que sistemas eletrônicos saibam a posição angular do eixo, a direção de rotação e a velocidade de rotação. Sua aplicação em máquinas desse modelo se faz quase que obrigatória, entretanto possui um valor dispendioso, e, já que a ideia é produzir um máquina mais simples, não vamos optar por sua utilização.

Figura 20 – Encoder.



Fonte: Walfront.

Uma régua potenciométrica (ou sensor potenciométrico linear), conforme apresentado na Figura 21, é um tipo de sensor de posição linear baseado no princípio do potenciômetro, ou seja, uma resistência variável com um cursor deslizando. É composta por uma trilha resistiva linear e um cursor (ou haste) que se move ao longo dessa trilha. À medida que o cursor se desloca, a resistência entre os terminais muda, o que gera uma variação de tensão elétrica proporcional à posição. Essa variação pode ser lida por um microcontrolador (como um ESP32 ou Arduino) para determinar a posição exata do cursor ao longo da régua. Também tem ótima aplicabilidade nesse caso, porém é ainda mais cara que o encoder, tendo assim o mesmo destino que ele nesse projeto.

Figura 21 – Régua potenciométrica.

Fonte: PWM Régua Digitalis.

Utilizar o passo do fuso foi analisado a melhor opção, pois é barato e garante precisão moderada, para uma máquina protótipo é suficiente. O seu funcionamento se dá pelo cálculo de passos do motor dividido pelo passo do fuso. Exemplo, se o motor realiza uma volta completa em 200 passos, e o meu fuso tem uma volta completa em 4 mm, resulta em cada passo do motor movimentar 2 centésimos da castanha acoplada no fuso. Dessa forma podemos transformar o passo do motor em deslocamento.

3.2.9 Tipo de fuso

Como utilizar-se-á o passo do fuso como tradutor de deslocamento, deve-se escolher bem o modelo a ser utilizado, pois qualquer problema no fuso acarretará em falhas na leitura do deslocamento.

Temos a possibilidade de utilizar três tipos de fuso: o de esferas, o trapezoidal e o de avanço.

O fuso de esferas, conforme Figura 22, possui esferas rolando entre o eixo roscado e a castanha, reduzindo o atrito. Tem como vantagens a alta eficiência, alta precisão e repetibilidade e baixo desgaste (vida útil longa). Ideal para aplicações com carga moderada e alta velocidade, porém é mais caro, mais sensível a contaminação (poeira, sujeira) e pode exigir lubrificação frequente.

Figura 22 – Fuso de esferas.

Fonte: Soluções Industriais.

No fuso trapezoidal(Figura 23), o atrito ocorre diretamente entre a rosca do fuso e a porca (castanha), geralmente de bronze ou polímero. Tem como vantagens ser mais barato ter boa capacidade de carga estática e auto-frenagem (não recua quando o motor para, dependendo do passo. Suas aplicações típicas são:

- Ajustes manuais;
- Prensas;
- Máquinas simples ou onde o auto-travamento é desejável.

Figura 23 – Fuso trapezoidal.

Fonte: JR Laminação.

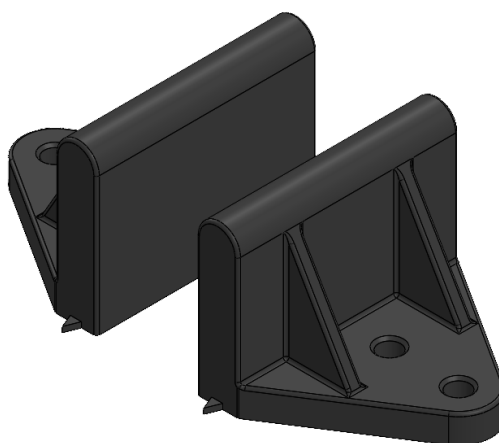
O fuso de avanço é um fuso com passo maior (distância que a porca avança por volta), pode ser um tipo especial de fuso trapezoidal ou até de esferas com rosca mais "aberta". Tem como vantagens o movimento linear mais rápido com menos rotações, boa para aplicações com deslocamento longo e baixa carga, porém tem menor força mecânica (torque convertido em menos força), pode perder resolução ou controle fino e pode não ser auto-frenante, dependendo do tipo.

Necessita-se de um fuso que auxilie no movimento lento, seja resistente e acessível, dessa forma, o que melhor se aplica é o fuso trapezoidal. Para esse projeto, optou-se pelo Fuso TR8x4 que tem Ø8 mm de diâmetro e desloca 4 mm por volta.

3.2.10 Apoios

Os apoios (Figura 24) servem para sustentar o corpo de prova no momento do teste. Eles podem ser usinados em aço, impressos em 3D com a utilização de algum filamento polimérico como ABS ou PLA, ou usinados em poliacetal. Para a construção da máquina, optou-se por utilizar apoios impressos em ABS, já que o mesmo quando maciço apresenta uma boa resistência mecânica. Vale ressaltar que essa escolha pode se mostrar controversa, já que o que irá ser ensaiado provavelmente será um corpo de prova de mesmo material. Porém como estamos tratando de uma máquina protótipo, essa é a maneira mais rápida e barata de se colocar em prática, partindo-se para a fabricação final da máquina, provavelmente optaria-se por usinagem em aço.

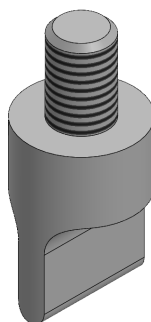
Figura 24 – Apoios.



Fonte: Autor.

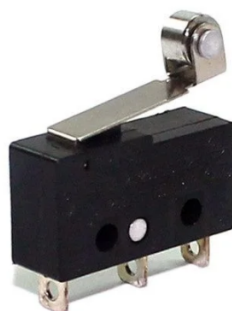
3.2.11 Transpassante

O Transpassante (Figura 25) é o responsável por aplicar a carga que é gerada pelo motor e transmitida pelo conjunto transmissão diretamente no corpo de prova. Ele ficará acoplado na célula de carga para que a mesma consiga traduzir os dados do ensaio. Por sua vez, assim como os apoios, pode ser usinado em aço ou poliacetal ou impresso em 3D. Nesse caso, como queremos que ele aplique a força diretamente no corpo de prova, precisamos que ele seja mais duro que o mesmo, para que o teste faça sentido. Sendo assim optou-se por usinar o transpassante em aço, utilizando os equipamentos do LAM no IFSC.

Figura 25 – Transpassante.**Fonte: Autor.**

3.2.12 Sensor fim de curso

Toda máquina que lida com algum tipo de deslocamento precisa de um sensor fim de curso, para que consiga fazer dele seu "*home*". Essa é uma técnica bastante utilizada para auxiliar os controladores a se orientar no que diz respeito ao posicionamento do sistema. No mercado existem várias opções para a implementação dessa função. Podemos utilizar algo como um sensor indutivo, que irá identificar a proximidade de materiais metálicos, ou um sensor mecânico, que ao ser acionado troca o estado da chave de contato, mas a melhor saída aqui é a mescla entre sensor mecânico e implementação via *software*. Para usarmos o sensor indutivo, precisaríamos ainda projetar uma haste metálica que fizesse contato com o mesmo, além do sensor ser mais caro que o mecânico, ainda teríamos o preço da haste. Se utilizássemos somente o mecânico, correríamos o risco de falha no mesmo. A junção entre sensor mecânico e software nos garante mais robustez, já que podemos contar com os dois mundos. Por meio da programação, podemos definir por vários meios como desligar o motor, fazendo com que o mesmo permaneça imóvel. Aliar isso ao sensor mecânico (Figura 26) nos permite muito mais controle e redução de custo.

Figura 26 – Sensor fim de curso.**Fonte: CNLW.**

3.2.13 Conexão

Para receber os dados do ensaio (carga e deslocamento), devemos conectar a máquina ao computador. Existe a possibilidade de utilizar o Wi-Fi, *bluetooth* ou comunicação serial.

O Wi-Fi é um método que tem como vantagem não depender de um computador próximo, já que os dados do gráfico serão enviados via internet, podemos acessá-los de diversas outras formas.

Com o bluetooth, a conexão não precisa de internet, o que nos garante muito mais versatilidade, permitindo utilizar a máquina em situações adversas.

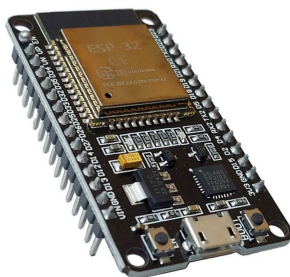
A comunicação serial é bem mais simples que os outros métodos, conectada diretamente ao controlador, permite transmissão de dados de forma mais rápida.

A proposta inicial era de conectar a máquina a internet via Wi-Fi, para que ganhássemos versatilidade, porém dado a capacidade de processamento do controlador escolhido, essa opção poderia vir a comprometer a realização do projeto, sendo assim, seguiu-se com a opção da comunicação serial, por ser mais simples e direta em relação às demais.

3.2.14 Controlador

Parte crucial do projeto, o controlador é o responsável por coordenar as operações lógico programáveis, portanto, sem ele não existe máquina. Pesquisando os controladores mais utilizados em máquinas desse tipo, encontramos componentes como Xilinx Artix-7, Intel (Altera) Cyclone V SoC ou Infineon AURIX TC375, todos controladores caros porém com altíssima performance. Como estamos projetando uma máquina de baixo custo, vamos optar por componentes mais viáveis, como Raspberry PI, Arduino ou a ESP-32. Cada um desses possui suas particularidades, avaliando o que necessitamos e levando em consideração possibilidade de melhorias futuras e custo, optou-se pela ESP-32(Figura 27), que possui Wi-Fi integrada e é mais barata que a "Rasp".

Figura 27 – ESP-32.



Fonte: Piscaled.

Levando em consideração todos os dados apresentados, temos na Figura 28 o resultado das escolhas realizadas:

Figura 28 – Matriz Morfológica 02.

Função	Popostas de solução		
Estrutura principal	Somente um atuador	Dois atuadores	Um atuador + guia linear
IHM	Display na máquina	Interface no computador	Display na máquina + interface computador
Aplicador de força axial	Motor de passo	Atuador hidráulico	Atuador pneumático
Suportes	Usinado em aço	Impresso em filamento plástico	Usinado em poliacetal
Transformação de força	Guia linear	Via perfil de alumínio	
Tipo de coluna	Usinada	Perfil de alumínio	Chapa metálica
Captção de carga	Célula de carga	Dinamômetro	Extensômetro
Captção de deslocamento	Encoder	Passos do fuso	Régua potenciométrica
Tipo de fuso	Fuso de esferas	Fuso trapezoidal	Fuso de avanço
Apoios	Usinado em aço	Impresso em filamento plástico	Usinado em poliacetal
Transpassante	Usinado em aço	Impresso em filamento plástico	Usinado em poliacetal
Sensor fim de curso	Sensor indutivo	Sensor mecânico	Sensor mecânico + software
Conexão	Wi-Fi	Bluetooth	Serial
Controlador	Raspberry PI	ESP-32	Arduino

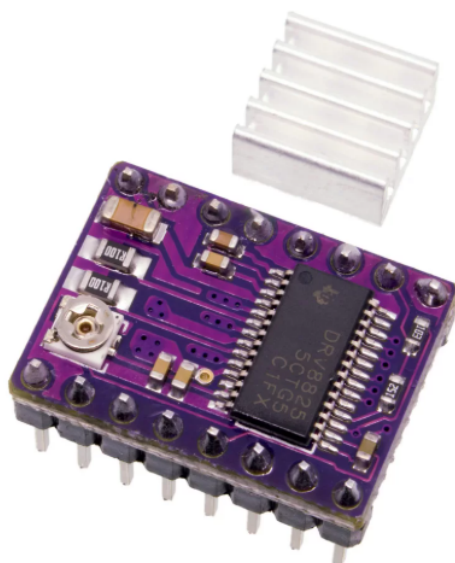
Fonte: Autor.

3.3 Componentes eletrônicos

Nesse tópico, comentar-se-á um pouco sobre os componentes eletrônicos necessários para a interligação e transformação de sinais recebidos pelo controlador.

3.3.1 DRV8825

Figura 29 – DRV8825.



Fonte: Piscealed.

O DRV8825, apresentado na Figura 29, é um *driver* de controle de motores de passo bipolares. Este componente foi selecionado no projeto por sua capacidade de operar com alta precisão, corrente ajustável e suporte a *microstepping*, características fundamentais para o controle de movimentos lineares em sistemas de ensaio mecânico.

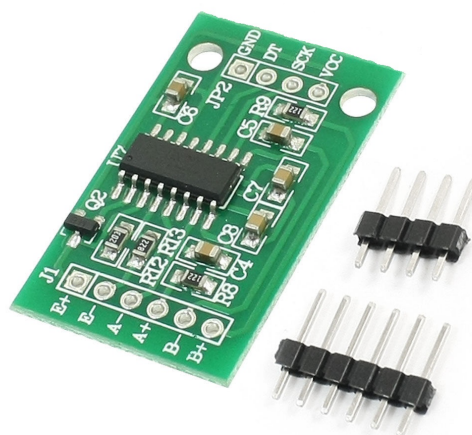
O *driver* permite controlar motores de passo utilizando sinais digitais simples de passo (STEP) e direção (DIR) provenientes de um microcontrolador, como o ESP-32. Ele fornece até 2,2 A por fase com resfriamento adequado por meio de um dissipador, suportando tensões de alimentação de 8,2 V a 45 V.

Um dos diferenciais do DRV8825 é o suporte a *microstepping* de até 1/32, o que proporciona suavidade e precisão no deslocamento, permitindo controle fino sobre a posição. Esse recurso é especialmente útil em aplicações que exigem alta resolução, como a movimentação do transpassante em uma máquina de ensaio de flexão.

Além disso, o DRV8825 possui proteções internas contra sobrecorrente, subtensão e superaquecimento, aumentando a confiabilidade do sistema. A corrente fornecida ao motor pode ser ajustada por meio de um *trimpot*, permitindo limitar o torque de forma segura e eficiente.

3.3.2 HX711

Figura 30 – HX711.



Fonte: Robo Core.

O HX711 (Figura 30) é um amplificador de sinal de precisão com conversor analógico-digital, projetado especificamente para a leitura de células de carga baseadas em extensômetros. No contexto deste projeto, o HX711 é utilizado para a aquisição dos dados de carga aplicados durante o ensaio de flexão mecânica.

As células de carga do tipo ponte de *Wheatstone*, como as do tipo *S-beam*, geram sinais de muito baixa amplitude (na ordem de milivolts). O HX711 realiza a amplificação desses sinais com ganho programável, tornando-os compatíveis com os níveis de entrada de microcontroladores como o ESP-32.

O módulo opera com alimentação de 2,7 V a 5,5 V e possui uma interface digital baseada em dois pinos: DT (Data) e SCK (Clock). Essa interface permite a comunicação direta com o microcontrolador, dispensando a necessidade de um ADC externo.

3.3.3 LM2596

Figura 31 – LM2596.



Fonte: Eletroparts.

O LM2596(Figura 31), é um módulo regulador de tensão do tipo *step-down* (ou *buck converter*) amplamente utilizado para converter tensões mais altas em níveis mais baixos, de forma eficiente. Baseado em comutação (*switching*), ele opera com eficiência superior a 70%, sendo ideal para alimentar circuitos sensíveis com estabilidade e segurança, sem desperdício excessivo de energia.

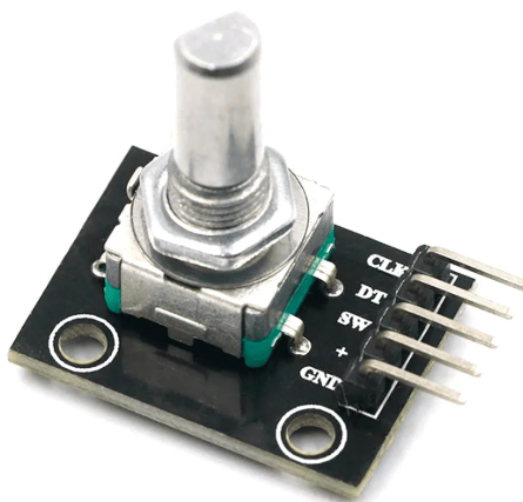
No projeto, o módulo LM2596 foi utilizado para converter a tensão da fonte principal de 24 V para 5 V, adequados ao funcionamento de dispositivos como o ESP-32, HX711 ou display OLED, que exigem tensões estabilizadas para operar corretamente e com precisão.

O módulo possui um potenciômetro que permite ajustar manualmente a tensão de saída, facilitando a adequação a diferentes dispositivos eletrônicos. Além disso, possui terminais de fácil conexão (VIN+, VIN-, VOUT+, VOUT-), o que simplifica sua integração em projetos embarcados e protótipos.

No presente trabalho, a utilização do LM2596 garantiu o fornecimento de tensão estável aos módulos eletrônicos, evitando flutuações que poderiam comprometer leituras sensoriais ou o funcionamento de comunicação serial. Sua aplicação foi essencial para o funcionamento confiável do sistema de aquisição e controle do ensaio de flexão.

3.3.4 KY-040

Figura 32 – KY-040.



Fonte: Eletroparts.

O KY-040(Figura 32) é um módulo *encoder* rotativo incremental amplamente utilizado em projetos embarcados como interface de entrada para navegação em menus, ajustes de parâmetros e controle rotativo de variáveis. Seu funcionamento se baseia em dois canais de saída digital (CLK e DT), que fornecem pulsos alternados conforme o eixo é girado. A ordem desses pulsos permite ao microcontrolador determinar tanto o sentido (horário ou anti-horário) quanto o número de passos realizados. Além disso, o módulo KY-040 possui um botão integrado ao próprio eixo, conectado ao pino SW (*Switch*), o que permite ao usuário realizar seleções ou confirmações diretamente pelo pressionamento.

No contexto deste trabalho, o encoder KY-040 foi empregado como interface principal de controle do sistema embarcado, permitindo ao operador navegar por menus, selecionar normas de ensaio, ajustar parâmetros, entre outros. A rotação do encoder atualiza dinamicamente o display OLED com as opções disponíveis, enquanto o botão SW atua como comando de confirmação.

A simplicidade do KY-040, combinada à sua funcionalidade confiável, tornou-o ideal para ambientes com espaço e custo limitados, proporcionando uma interface física prática e eficiente entre o usuário e o sistema de controle embarcado.

3.3.5 Capacitores

Figura 33 – Capacitor cerâmico.



Fonte: Eletroparts.

Figura 34 – Capacitor eletrolítico.



Fonte: Eletroparts.

A utilização dos capacitores (Figura 33 e Figura 34) se deu para garantir mais estabilidade ao sinal gerado pelo *driver* HX711. Foram feitos filtros moduladores com a junção de capacitores cerâmicos ($0.1\mu\text{F}$) e eletrolíticos ($10\mu\text{F}$ e $100\mu\text{F}$), nos pinos de alimentação dos *drivers* HX711, DRV8825 e no controlador ESP-32.

Com isso, o sistema consegue operar com muito menos ruído, o que auxilia a captação dos valores de carga, fazendo toda a programação fluir melhor, pois o filtro não deixará valores que diferem muito das leituras vigentes passarem para o controlador.

4 INTEGRAÇÃO

Nesta parte do trabalho, será apresentado um resumo de como se deu a parte da integração entre todas as partes do projeto. Serão abordados procedimentos, testes e métodos de fabricação necessários para se chegar a montagem final.

4.1 Mecânica

Para integrar toda mecânica foram necessárias algumas etapas que estarão descritas a seguir.

4.1.1 Estrutura principal

Para construir a estrutura principal, seguindo a ideia do tópico 3.2.1, utilizou-se um conjunto de perfis de alumínio 45x45 mm em quatro comprimentos, como também comentado no tópico 3.2.6.

Os perfis foram obtidos no MOP, e para ficar com tamanho adequado, foram cortados utilizando a serra de fita gravitacional do IFSC. A coluna principal tem 500 mm de comprimento para comportar o fuso, que tem 300 mm e sobrar espaço para instalação do motor/redução e suporte. Já o comprimento dos perfis da borda se deu para dispor os componentes eletrônicos e *protoboard* em cima da base, no período de testes e implementações. Por fim, o perfil central tem o objetivo de estruturar e dar suporte a fixação dos apoios que irão sustentar o corpo de prova.

Para a base, utilizou-se uma chapa de 5 mm de compensado, sendo fixada por meio de parafusos Allen M8 e porcas “T” nas extremidades dos perfis. Como a máquina possibilita apenas o teste funcional da máquina, a base ser de madeira não influência na validação dos resultados.

4.1.2 Sistema de aplicação de carga

Uma das partes principais da máquina, o sistema de aplicação de carga conta com os seguintes componentes:

- Motor NEMA 17 4,2 kgf.cm;
- Redução 10:1;
- Acoplamento linear Ø8 x Ø8 mm;
- Fuso TR8x4 com castanha;
- Mancal com rolamento Ø8 mm;
- Suporte do motor/redução;

- Suporte da Célula de carga;
- Célula de carga "modelo"
- Transpassante
- Parafusos Allen
- Porcas "T"

A utilização do conjunto motor NEMA 17 4,2 kgf.cm com a redução 10:1 se fez suficiente, pois estaremos lidando com ensaios de polímeros como o ABS. Abaixo encontram-se os cálculos que simulam quanto de carga se faz necessário para o rompimento de um corpo de prova padrão da norma ASTM D790, e quanto de carga o sistema atual consegue aplicar na ponteira do transpassante.

Parâmetros do corpo de prova F :

- Espessura, $d = 3,2 \text{ mm} = 0,0032 \text{ m}$
- Largura, $b = 12,7 \text{ mm} = 0,0127 \text{ m}$
- Comprimento entre apoios, $L = 16 \cdot d = 16 \cdot 0,0032 \text{ m} = 0,0512 \text{ m}$
- Tensão de ruptura por flexão típica do ABS, $\sigma = 65 \text{ MPa} = 65 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

Fórmula:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2}$$

Isolando a força F :

$$F = \frac{2bd^2 \cdot \sigma}{3L}$$

$$F = \frac{2 \cdot 0,0127 \cdot (0,0032)^2 \cdot 65 \times 10^6}{3 \cdot 0,0512}$$

$$F = \frac{2 \cdot 0,0127 \cdot 1,024 \cdot 10^{-5} \cdot 65 \cdot 10^6}{0,1536}$$

$$F \approx \frac{16,9392}{0,1536} \approx 110,3 \text{ N}$$

A força estimada para provocar a ruptura do corpo de prova de ABS com espessura de 3,2 mm é de aproximadamente:

$$F \approx 110 \text{ N}$$

Tem-se a seguir quanto de força o sistema consegue aplicar na ponta do transpassante:

Parâmetros do sistema:

- Torque do motor NEMA 17: $T_{\text{motor}} = 4,2 \text{ kgf cm}$
- Conversão: $1 \text{ kgf.cm} = 0,09807 \text{ Nm}$
- Redução: 10:1 (torque multiplicado por 10)
- Passo do fuso TR8x4: $p = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$
- Eficiência do fuso trapezoidal (estimada): $\eta = 50\% = 0.5$

Cálculo do torque na saída do redutor:

$$T_{\text{motor}} = 4,2 \times 0,09807 = 0,411 \text{ Nm}$$

$$T_{\text{saída}} = T_{\text{motor}} \times 10 = 0,411 \times 10 = 4,11 \text{ Nm}$$

Cálculo da força linear ideal no fuso:

Fórmula:

$$F = \frac{2\pi T}{p}$$

Substituindo:

$$F_{\text{ideal}} = \frac{2\pi \times 4,11}{0,004} \approx 6456 \text{ N}$$

Corrigindo com eficiência do fuso:

$$F_{\text{real}} = F_{\text{ideal}} \times \eta = 6456 \times 0,5 = 3228 \text{ N}$$

A força linear aproximada aplicada pelo sistema (motor + redutor + fuso TR8x4 + castanha), desconsiderando quaisquer alavancas ou deslocamentos laterais, é de aproximadamente:

$$F \approx 3228 \text{ N}$$

Agora, considerando uma haste usinada em aço rígida com distância entre centros de 32,65 mm do fuso, assume-se uma perda equivalente a um ângulo de desvio θ , de modo que $\cos(\theta)$ representa a fração útil da força. Podemos estimar uma perda devido ao momento de 30%, com base na fórmula a seguir:

$$F_{\text{ponta}} = F_{\text{real}} \cdot \cos(\theta)$$

$$F_{\text{ponta}} = 3228 \cdot \cos(30^\circ)$$

$$F_{\text{ponta}} \approx 3228 \cdot 0,866 \approx 2795 \text{ N}$$

Comparando a força necessária para romper o corpo de prova e a capacidade total de carga aplicada pelo conjunto motor/redução, conclui-se que é mais que o suficiente para realizar o teste.

O fuso trabalha em conjunto com o acoplamento linear e o mancal com rolamento, esses dois componentes permitem que possíveis desnivelamentos entre os eixos sejam corrigidos e estabilizados, garantindo mais linearidade ao sistema, são essenciais para montagens que envolvem transmissão entre eixos.

O suporte do motor/redução irá sustentar o conjunto no lugar para reduzir a carga aplicada em cima do eixo. Já o suporte da célula de carga é o responsável em

conjunto com a castanha por transformar torque em força axial. Ele será fixo em uma das faces da coluna central, porém permitindo movimento. Na sua ponta a célula de carga será acoplada, e na outra extremidade da célula será instalado o transpassante.

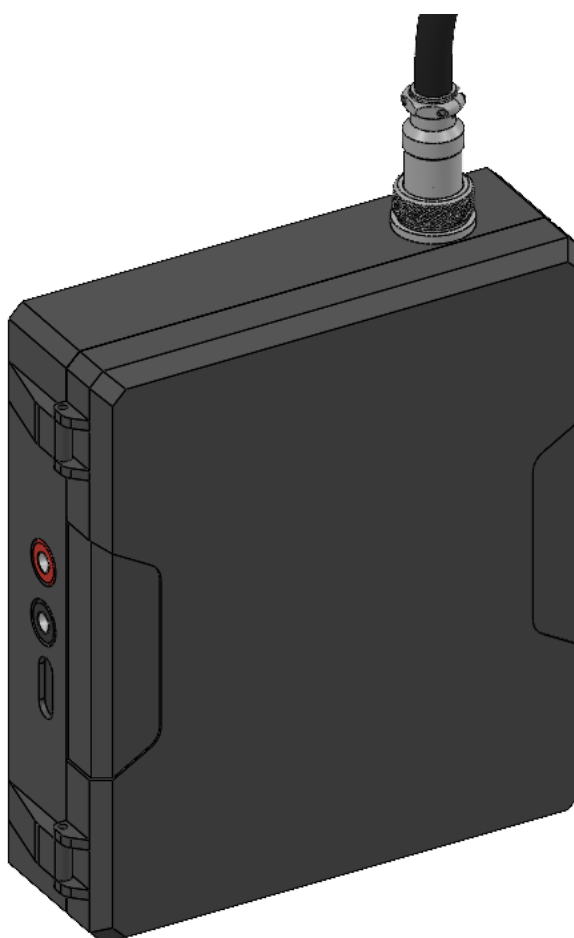
Dessa forma todo nosso sistema de transmissão está montado. Vale ressaltar que em uma máquina mais robusta, seria utilizada uma guia linear em conjunto com o suporte da célula de carga, porém como estamos fazendo a prototipagem de uma máquina protótipo, o perfil em alumínio mostrou-se suficiente.

Os parafusos e porcas fixam todo o conjunto, estando presentes em todas as submontagens.

4.1.3 Case da placa e periféricos

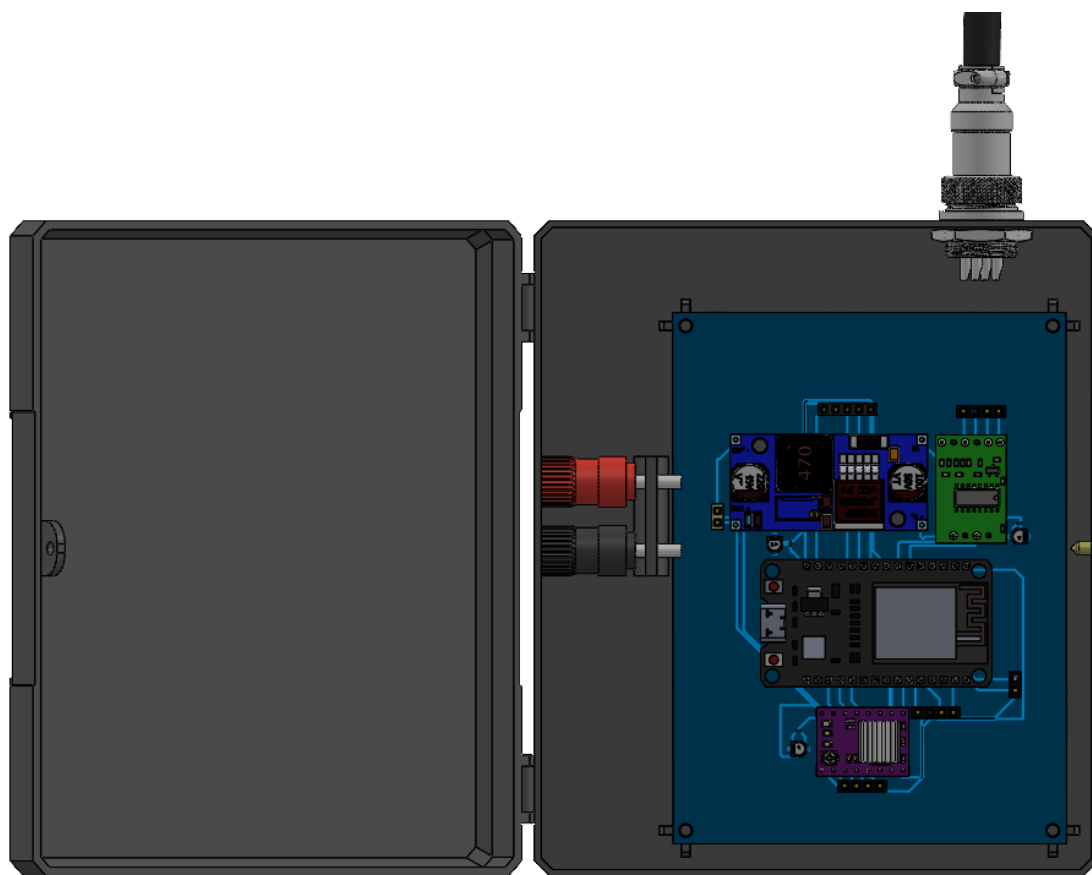
O case da placa, apresentado nas Figuras 35 e 36 se fez necessário para instalação da maioria dos eletrônicos. Com ele, podemos fazer a montagem e manutenção do sistema de forma mais prática.

Figura 35 – Case da placa 01.



Fonte: Autor.

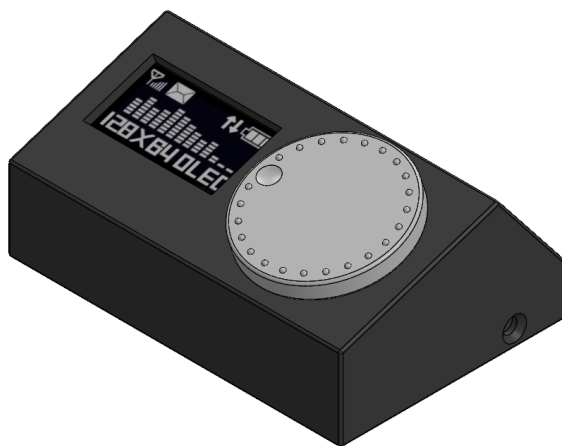
Figura 36 – Case da placa 02.



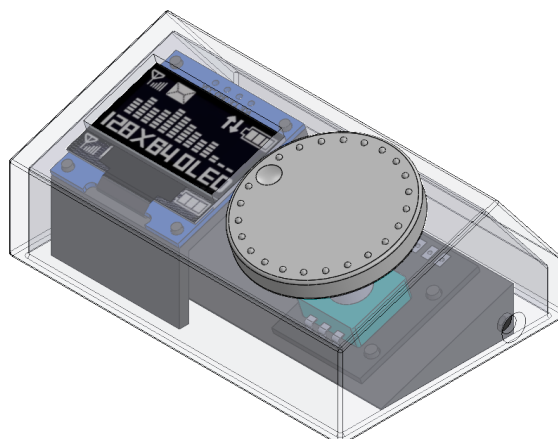
Fonte: Autor.

Já os periféricos(Figura 37 e Figura 38) são componentes que auxiliam a utilização dos eletrônicos, como é o caso da roda seletora acoplada no KY-040, que permite um controle mais preciso do *encoder*.

Figura 37 – Suporte IHM 01.



Fonte: Autor.

Figura 38 – Suporte IHM 02.**Fonte: Autor.**

4.2 Eletrônica

Agora entraremos na parte de integração eletrônica, onde serão mostrados os esquemas elétricos, alimentação, ligações e adaptações necessárias para realizar a montagem e instalação dos componentes.

4.2.1 Alimentação

A Tabela 1 mostra todos os componentes do conjunto, e quanto de tensão se faz necessário para seu funcionamento:

Tabela 1 – Tensão de operação dos principais componentes utilizados

Componentes	Tensão
ESP-32	3,3 – 5 V
DRV8825	8 – 45 V
HX711	2,7 – 5 V
Display OLED	3,3 – 5 V
KY-040	3,3 – 5 V
Sensor fim de curso	3,3 – 5 V
LM2596	7 – 35 V

Levando os dados apresentados em consideração, temos que ao alimentar a ESP-32 com 5 V, temos tensão suficiente para alimentar a maioria dos componentes, faltando apenas uma fonte externa para alimentarmos o DRV8825 e o LM2596.

Sendo assim, alimentamos a ESP-32 pelo cabo USB do computador, fornecendo 5 V ao controlador, e conectamos o *driver* HX711, o encoder KY-040, o sensor fim de curso, o *display* OLED e as entradas de alimentação dos pinos STEP e DIR do DRV8825 para receber energia diretamente do controlador. Para fornecer energia

para as entradas restantes do *driver* do motor, utilizamos uma fonte externa de 24V - 4,5 A, esse valor de tensão se faz preferível para controlar o motor pois com 24 V ele consegue gerar mais torque do que com 12 V.

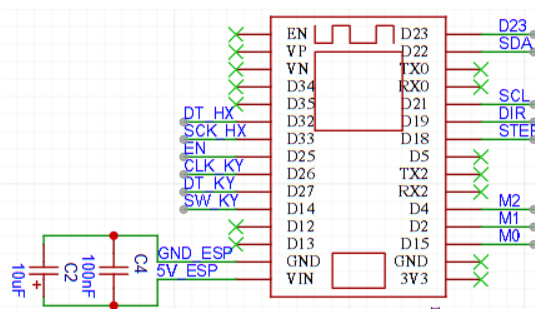
Ao alimentar o conjunto, notou-se que o sinal da célula de carga amplificado pelo HX711 estava lendo muitos dados errados. Sendo assim optou-se por utilizar o LM2596, que regula a tensão de 24 V que advêm da fonte para fornecer 5 V isolados ao *driver* da célula de carga.

O fato de isolarmos a tensão do HX711 é muito importante pois garante que oscilações do controlador não afetarão a leitura da célula. Outra medida muito importante para reduzir o ruído de leitura desse *driver* foi a instalação de capacitores entre as entradas e saídas da ESP-32, HX711 e DRV8825, essa medida nos dá uma proteção ainda maior contra os ruídos. Por fim, ainda foram conectados todos os pinos GND dos componentes, para que a referência seja a mesma, aumentando ainda mais as chances de redução de possíveis interferências de sinal.

4.2.2 ESP-32

A ESP-32 é o controlador da máquina, sendo assim, envia e recebe sinais de todos os componentes com uma frequência muito alta. Na Figura 27, podemos ver no esquemático, todas as suas ligações:

Figura 39 – Esquemático ESP-32.

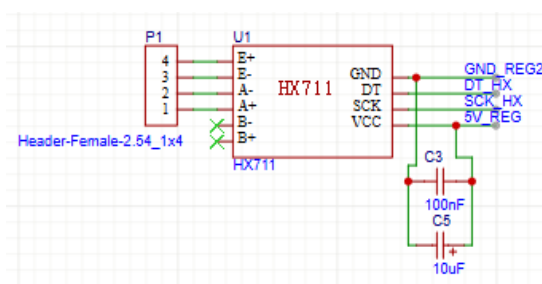


Fonte: Autor.

4.2.3 Motor e DRV8825

A Figura 40 apresenta o esquemático de ligação do motor NEMA 17 com o seu *driver*.

Figura 41 – Esquemático HX711.



Fonte: Autor.

Os pinos DT e SCK enviam os sinais para o controlador, já os pinos E+, E-, A+ e A- recebem a leitura da célula de carga. A função desse *driver* é justamente enviar o sinal recebido da célula amplificado para o controlador.

Por ser um sinal delicado, a forma com que é feita a ligação influencia bastante na qualidade. Dessa forma, utilizou-se um conector GX16-5, que permite uma conexão muito mais robusta. Outro ponto importante é diminuir o máximo possível o tamanho da fiação de transmissão de dados, quanto mais próximo estiverem do driver e da célula, mais estável será o sinal.

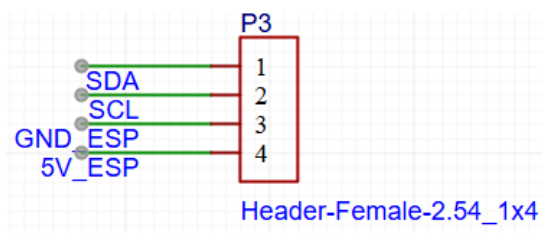
4.2.5 Display OLED e KY-040

O display OLED apresenta apenas 4 pinos, dois de alimentação e dois de sinal. O SDA e o SCL, são os pinos que recebem os sinais do controlador via protocolo I2C, facilitando e diminuindo drasticamente a quantidade de pinos necessários.

O *encoder* como já comentado irá servir como selecionador de opções do menu apresentado no display. Ele conta com 5 pinos, dois de alimentação e três de sinal. O DT e o CLK são responsáveis por definir a direção e pulsos. O SW é o responsável por levar o sinal de acionamento do botão embutido no *encoder*, que tem a função de selecionar a opção desejada.

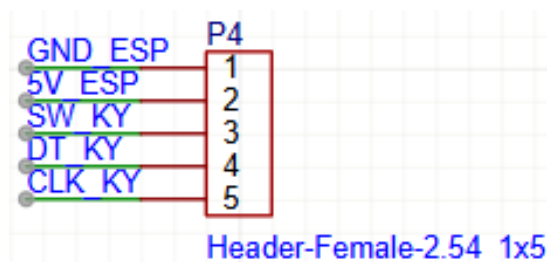
Os esquemas isolados são apresentados nas Figuras 42 e 43.

Figura 42 – Esquemático Display OLED.



Fonte: Autor.

Figura 43 – Esquemático KY-040.



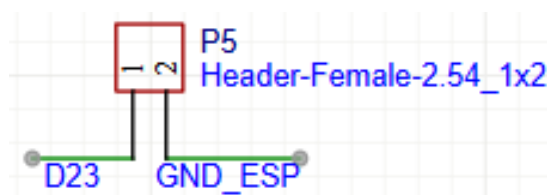
Fonte: Autor.

4.2.6 Sensor fim de curso

Para garantir a referência de posição do sistema, se faz necessário a instalação de um sensor fim de curso (Figura 44). Seu esquema é bem simples, uma chave mecânica que comuta entre “NA” e “NF”.

Quando solicitada a ida ao “HOME” pelo código, o sistema se desloca para cima até bater no fim de curso, dessa forma, adota-se aquele ponto como 0 no deslocamento total da máquina.

Figura 44 – Esquemático fim de curso.



Fonte: Autor.

4.3 Software

Por fim, iremos apresentar um pouco da integração entre *softwares* e as estratégias de programação para conseguirmos controlar todo o sistema de forma correta.

4.3.1 Arduino IDE

Para programar a ESP-32, utilizou-se do *software* Arduino IDE, que possibilita tanto a programação quanto o acompanhamento dos testes. O projeto se mostrou bastante complexo devido a quantidade de componentes controlados. A seguir temos as bibliotecas utilizadas:

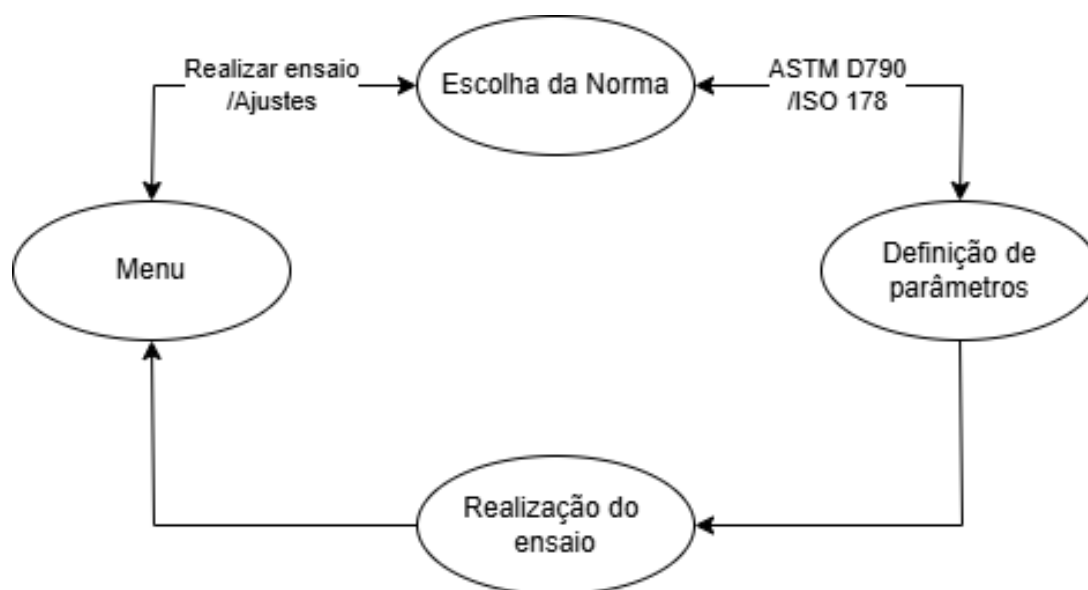
- <Wire.h>
- <Adafruit_GFX.h>

- <Adafruit_SSD1306.h>
- <AiEsp32RotaryEncoder.h>
- <AccelStepper.h>
- "HX711.h"
- <Ticker.h>
- "esp_task_wdt.h"
- <math.h>

Cada biblioteca serve para fornecer funções específicas para o controle dos componentes de forma mais prática.

A lógica do código pode ser representada pela Figura 45:

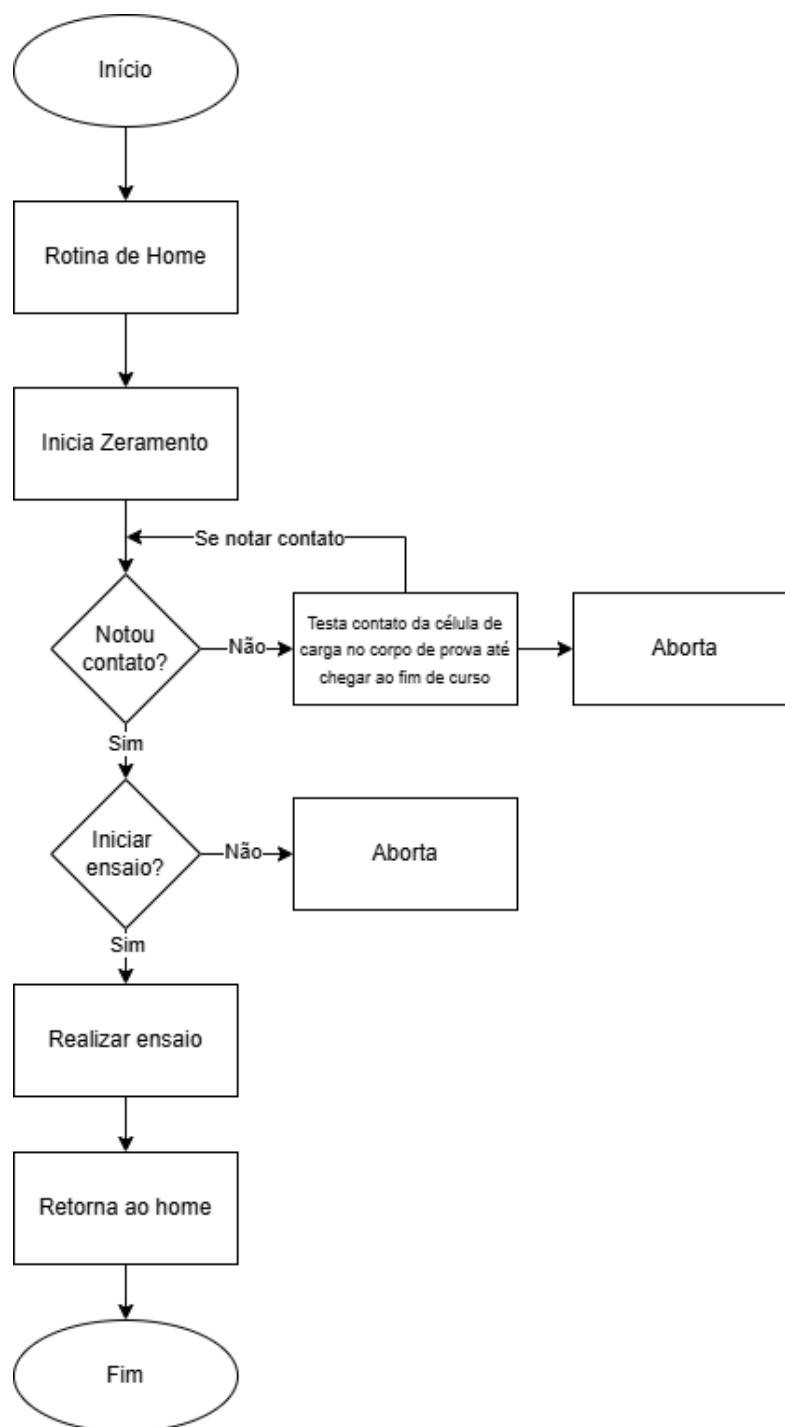
Figura 45 – Diagrama simplificado do código.



Fonte: Autor.

Como podemos observar, o menu controla todas as operações, permitindo que o operador navegue e escolha o que deseja realizar no momento. Como o objetivo da máquina é realizar o ensaio de flexão em corpos de prova poliméricos, devemos nos basear pelas normas ASTM D790 e ISO 178. Dentro dessas opções, tem-se uma gama de parâmetros que devem ser ajustados antes de se iniciar o teste. Após a escolha desses valores, o teste é iniciado seguindo uma sequência lógica bem definida, ilustrado na Figura 46 :

Figura 46 – Lógica do ensaio.



Fonte: Autor.

Houve muitos desafios ao se tratar do menu, pois apresenta uma organização complexa, que imita fielmente a apresentação e escolha dos dados como nas máquinas profissionais. Todas as interações como por exemplo rolagem de textos, mudança de cores e ajustes de parâmetros podem parecer simples mas envolvem uma lógica muito complexa por trás.

Porém o maior desafio que tivemos na parte da programação do controlador

foi o tratamento de vários sinais ao mesmo tempo. Para realizar o ensaio precisamos controlar a descida do motor e ler a célula de carga ao mesmo tempo, isso faz com que a ESP tenha que lidar com dois controles simultâneos, o que não é fácil dado a sua capacidade de processamento. Dessa forma, precisou-se utilizar um sistema de interrupção, que lê e envia os dados pela célula de carga via serial a cada 50 milissegundos. Também se fez necessário a utilização de um *Watchdog-Timer*, que irá reinicializar o controlador caso algum travamento fatal venha ocorrer. O fato da ESP-32 estar enviando pulsos para o motor, lendo e enviando dados da célula de carga a cada 50 ms e ainda checando se já chegou ao final do curso ou se a peça quebrou, faz com que o controlador muitas vezes trave devido ao grande número de solicitações. Dessa forma, a inclusão de vários pontos de *micro-delays* para garantir um tempo para a ESP poder atender esses processos teve que ser implementada.

```
1
2 void Ticker() {
3     switch (Estado) {
4
5         case false:
6             delay(1);
7             leituraCarga = scale.get_units();
8             pausaPorCarga = (leituraCarga >= LIMIAR_CARGA);
9             break;
10
11         case true:
12             delay(1);
13             leituraAtual = scale.get_units();
14             if ((ultimaLeituraCarga - leituraAtual) > 1000.0) {
15                 quedaDeCargaDetectada = true;
16             }
17             ultimaLeituraCarga = leituraAtual;
18             break;
19     }
20 }
```

Código 4.1 – Função Ticker() para monitoramento de carga

No Código 4.1, conseguimos ver a programação da interrupção, que a cada 50 ms roda uma série de comandos para executar funções específicas, representando uma parte crucial do projeto. O código completo da máquina pode ser encontrado nos apêndices.

4.3.2 Visual Studio

Para termos a possibilidade de visualizar o gráfico sendo gerado, desenvolveu-se uma interface em *python* por meio do *Visual Studio*, onde podemos acompanhar em tempo real os resultados do teste.

O maior desafio nessa parte do projeto foi sincronizar a transmissão dos dados via comunicação SERIAL. O *display* OLED e a célula de carga recebem e enviam dados a cada momento pela porta COM. A interface gráfica também se comunica com a ESP-32 via SERIAL, dessa forma, quando executávamos o ensaio sem utilizar a interface, ele funcionava corretamente, porém ao executar em conjunto com a interface, o controlador travava. Isso ocorreu pois a ESP-32 estava tentando se conectar com outra SERIAL no caso a da interface, que solicitava os dados da célula de carga para plotar no gráfico, causando assim uma pane no sistema, pois ele perdia a referência de conexão. Foi necessário a implementação de um botão na interface que permite a conexão e desconexão direta da porta COM, dessa forma a ESP não perde a referência, pois ela comuta o controle no momento em que o botão é acionado ou desacionado.

O código completo para a criação da interface pode ser encontrado nos apêndices.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Ao final do projeto, se fez possível o desenvolvimento da máquina para ensaio de flexão mecânica em polímeros. Toda a documentação técnica necessária se encontra nos apêndices. A seguir temos as especificações técnicas da máquina:

5.1 Custo

Um dos requisitos desse trabalho é o custo total da máquina, na Tabela 3 encontram-se os custos individuais de cada componente como também o custo total da máquina.

Tabela 3 – Custo da máquina de flexão mecânica

Componentes	Custo (R\$)
ESP-32	41,00
Display OLED “0.96”	29,00
HX711	5,90
Célula de carga 50 kgf (S-beam)	120,00
DRV8825	13,00
Regulador de tensão	11,05
Motor de passo NEMA 17	59,80
Redução 10:1	80,00
Estrutura em alumínio/perfis	221,85
Base compensado	40,45
Encoder rotativo KY-040	10,20
Fuso trapezoidal + castanha	64,99
Mancal com rolamento Ø8 mm	19,44
Acoplamento Linear	21,99
Impressão 3D / Usinadas / Suportes diversos	197,98
Parafusos e porcas	50,00
Total Estimado	986,65

Após os dados apresentados, pode-se averiguar que se obteve um custo acessível ao mercado.

5.2 Resultados

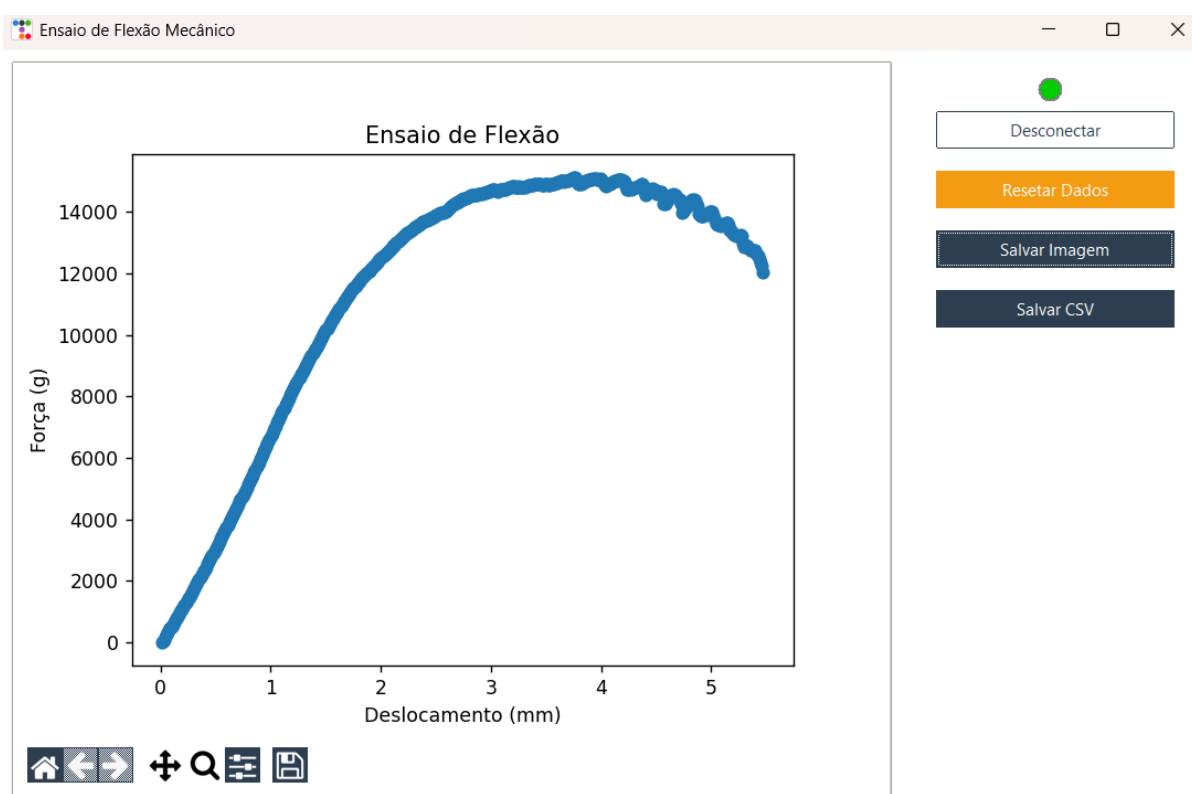
A máquina apresentou funcionamento satisfatório, conseguindo realizar tudo que foi proposto no início do trabalho, estrutura firme e estável, sistema de transmissão de carga barato e eficaz, menu de navegação embutido na máquina, interface no computador para acompanhamento do gráfico e ensaio baseado nas normas ASTM D790 e ISO 178. A confecção e compra de todos os componentes necessários foi suficiente para garantir o pleno desempenho, não se fazendo falta de nenhuma outra implementação.

Desafios como o baixo custo de implementação e baixa capacidade de processamento de sinais, dada a complexidade do projeto fizeram com que o tempo de fabricação se prolongasse mais do que o esperado. Devido o pouco tempo de desenvolvimento não se fez possível a comparação entre dados de testes já existentes com os gerados pela máquina.

É válido ressaltar que mesmo sem a possibilidade de comparação entre dados já existentes e confiáveis, a máquina apresentou resultados satisfatórios, com base na análise das tolerâncias e precisão. A máquina permitiu a validação da ideia de funcionamento como também análises básicas no que diz respeito a resistência a flexão de materiais poliméricos. Com ela, o usuário pode ter uma ideia geral da capacidade mecânica de cada material, permitindo tomadas de decisões mais embasadas, e não apenas empíricas.

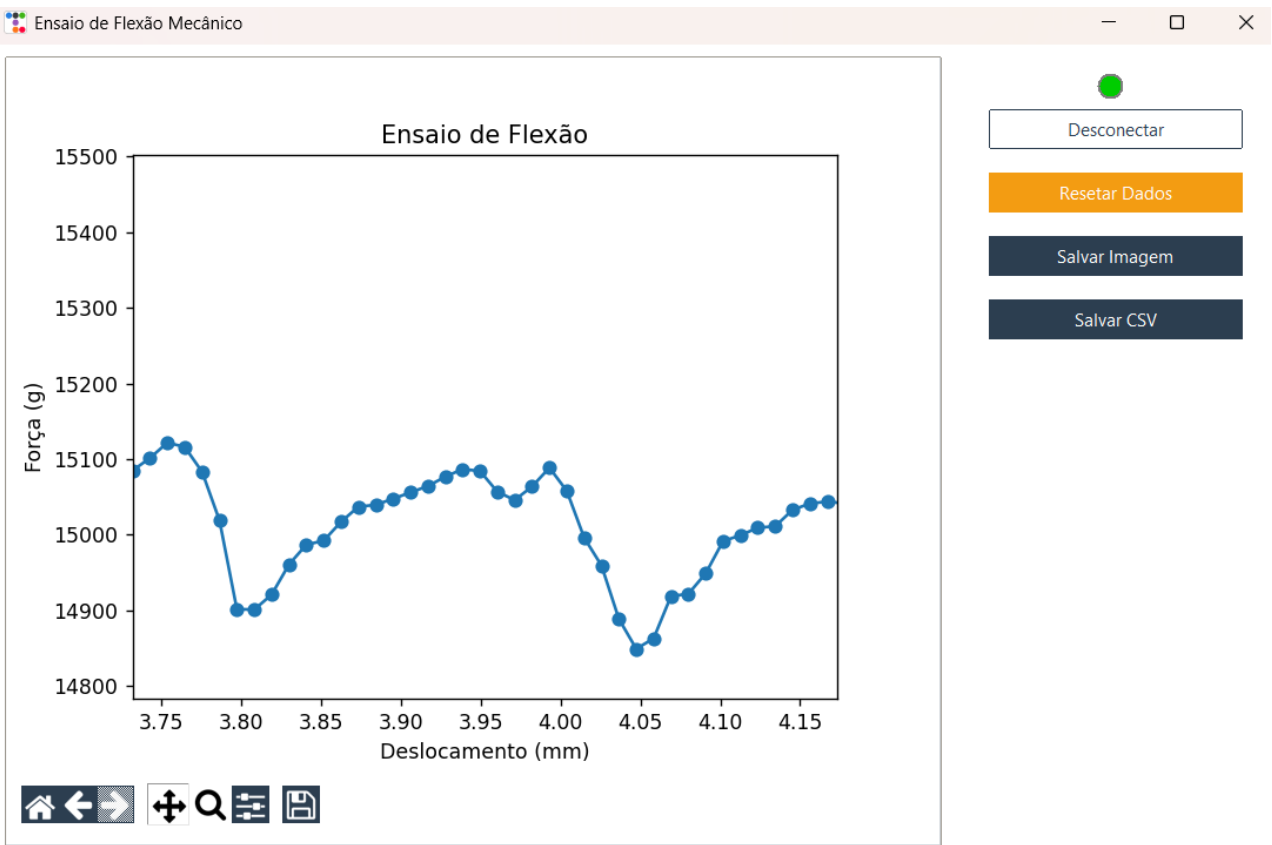
As Figuras 47, 48 e 49 apresentam algumas imagens dos testes realizados, como também do visual final da máquina.

Figura 47 – Ensaio de flexão.

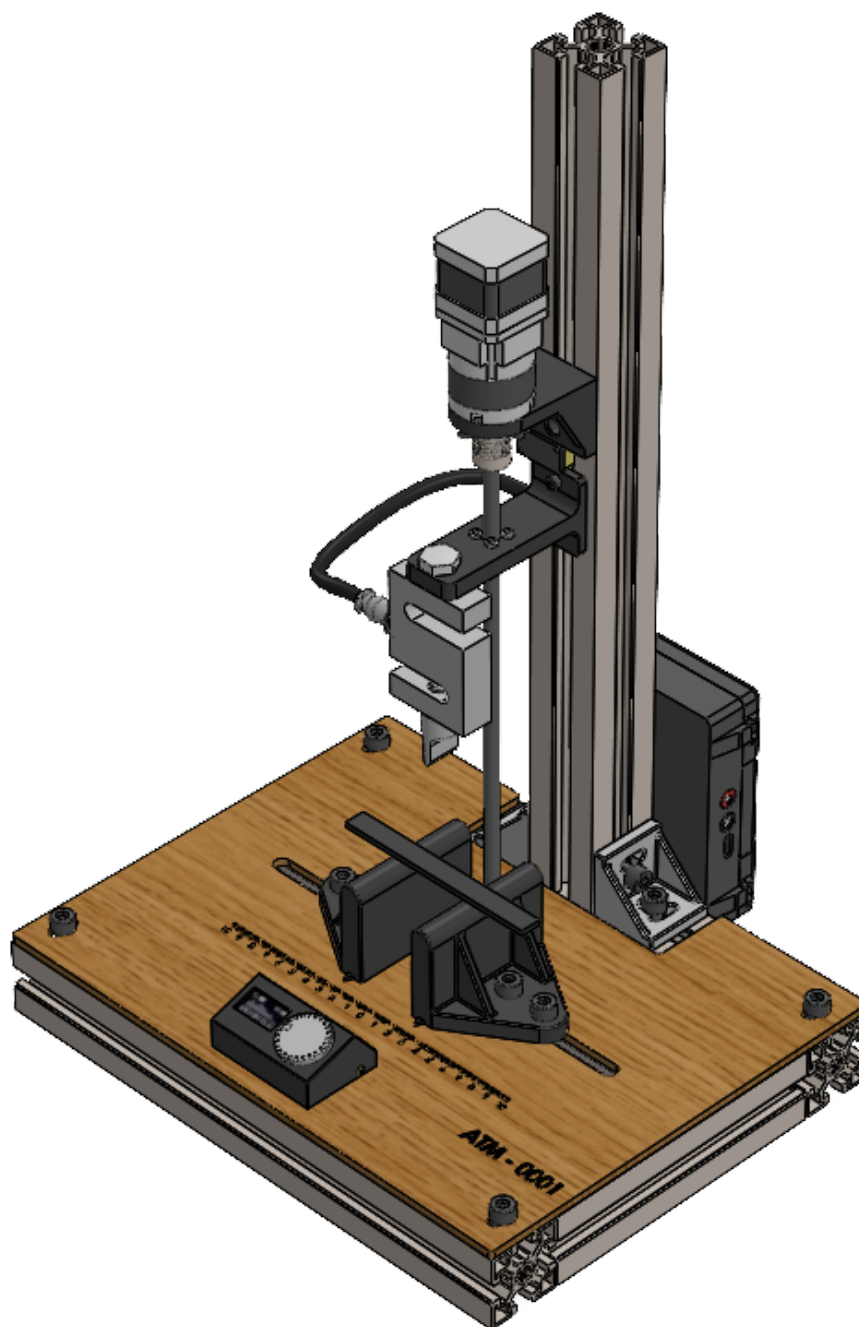


Fonte: Autor.

Figura 48 – Ensaio de flexão(análise de detalhes).



Fonte: Autor.

Figura 49 – Máquina para ensaio de flexão mecânica em polímeros.

Fonte: Autor.

5.3 Tolerâncias e precisão

Para avaliarmos qual a precisão dos dados fornecidos pela máquina, devemos nos basear em alguns pontos como os requisitos funcionais da máquina, análise dos componentes envolvidos e repetibilidade.

Temos que a máquina tem por função principal a execução de um ensaio de flexão mecânica em corpos de prova poliméricos via normas ASTM D790 e ISO

178 e apesar de utilizar-se de componentes básicos, apresenta valores satisfatórios de leitura.

Ao se medir a repetibilidade no deslocamento da castanha com um paquímetro, fez-se uma média de variação de ± 1 mm, porém vale ressaltar que questões como desalinhamento e perda de passo foram presenciadas. Isso se dá pela procedência dos componentes, que não tem processos de fabricação que garantam tanta precisão nas medidas finais, como também o paralelismo entre faces de montagem, gerando pequenas alavancas, que quando somadas acabam por prejudicar o deslocamento axial.

Se tratando da leitura da célula de carga, podemos considerar uma variação de ± 10 gramas, o que para o teste representa muito pouco dado que a carga aplicada geralmente vai girar em torno de quilogramas. O zeramento da mesma se deu com um peso padrão, que foi utilizado após ser medido em balança de precisão no laboratório de materiais do IFSC.

Sendo assim, avaliando a precisão da máquina como um todo, se mostrou satisfatória, dado que mesmo com baixa qualidade de componentes e orçamento reduzido, os erros de leitura apresentados podem ser considerados pequenos.

Outro ponto a acrescentar é que com a alteração de alguns processos de fabricação, componentes, como a guia linear, e até mesmo a aplicação de um sistema de visão para coletar os dados de deslocamento podem aumentar muito a confiabilidade da máquina.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como comentado anteriormente a máquina cumpriu com o seu objetivo, que nada mais é do que a validação da ideia da máquina de ensaio de flexão mecânica para polímeros. Nesse projeto, pode-se trabalhar com as diversas áreas envolvidas no curso de engenharia mecatrônica, com alto nível de multidisciplinaridade.

Algumas sugestões para trabalhos futuros encontram-se a seguir:

- Confeção da máquina em sua versão final;
- Análise dos resultados obtidos no teste em comparação com os apresentados em mercado;
- Como a troca de componentes pode influenciar na melhoria dos resultados;
- Avaliar a mudança do controlador, e seu impacto nos resultados;
- Confeção de uma máquina de ensaios universal (flexão, tração, compressão).

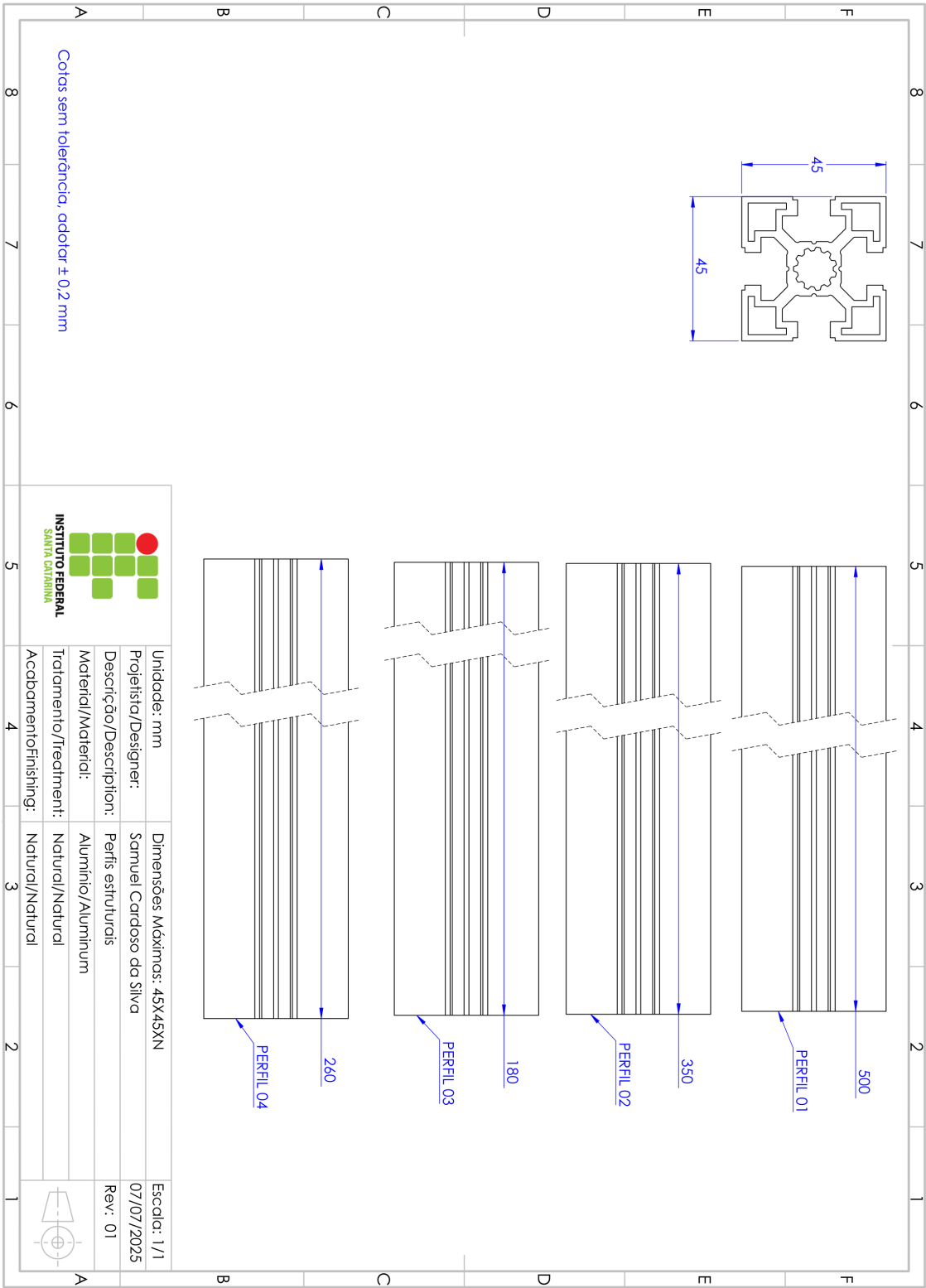
REFERÊNCIAS

- AL., F. P. B. et. *Resistência dos Materiais*. 7. ed. [S.l.]: AMGH, 2017. 15
- ASTM D790-22: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken, PA: [s.n.], 2022. 19
- CALLISTER, J. W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016. 15, 16, 18
- FREITAS, T. V. A. d. et al. Desenvolvimento de metodologias experimentais de baixo custo com o arduino e extensômetros para o ensino de mecânica dos sólidos no curso de engenharia mecânica. *Encontros Universitários da UFC*, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, v. 7, n. 17, 2022. 23
- ISO 178: Plastics – Determination of flexural properties. Geneva: [s.n.], 2019. 19
- LACERDA, E. de et al. Evolução histórica dos ensaios de prova de carga. *Revista da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC*, v. 07, n. 01, 2015. 15
- LAGES, M. d. S. et al. Desenvolvimento de uma máquina para ensaio de fadiga por flexão. *Revista Matéria*, v. 24, n. 1, 2019. 22
- MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. *Mechanical Behavior of Materials*. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2009. 15, 16, 18
- NAKAZATO, A. Z. *Desenvolvimento de máquina universal de ensaios mecânicos portátil de baixo custo para fins didáticos utilizando o conceito open-source*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá - SP, 2019. 23
- PAHL, G. et al. *Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento de Produtos Técnicos*. 6. ed. São Paulo: Blucher, 2005. Tradução da 6ª edição alemã. 22
- SILVEIRA, G. W. d.; CLARA, J. V. S. *Desenvolvimento e Construção de uma Máquina de Ensaio de Fadiga por Flexão Rotativa a Partir de Peças e Equipamentos Reutilizados*. Trabalho de Conclusão de Curso, Vitória, 2024. 22

APÊNDICES

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICOS

Figura 50 – DESENHOS TÉCNICOS-01.



Fonte: Autor.

Figura 51 – DESENHOS TÉCNICOS-02.

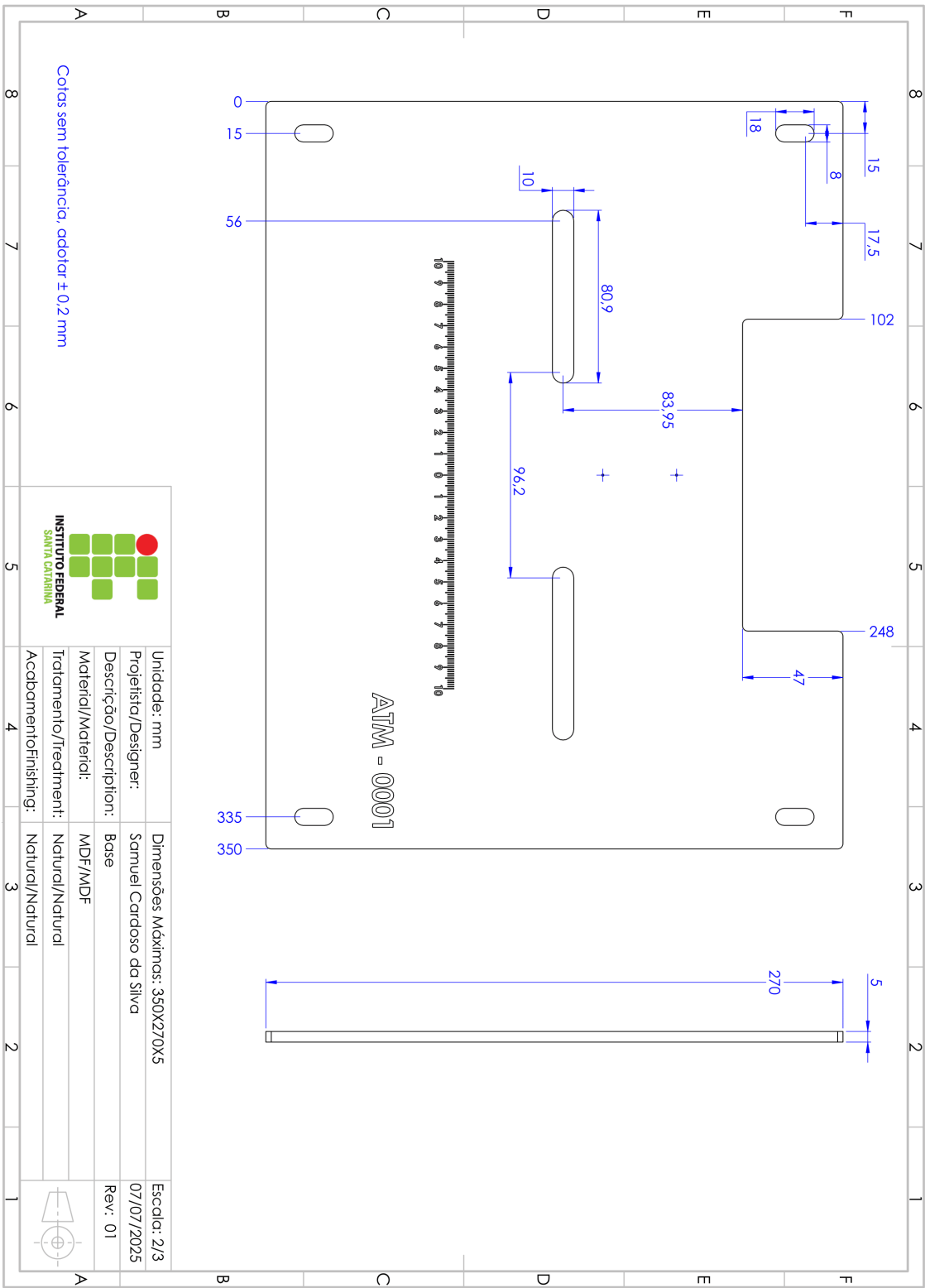
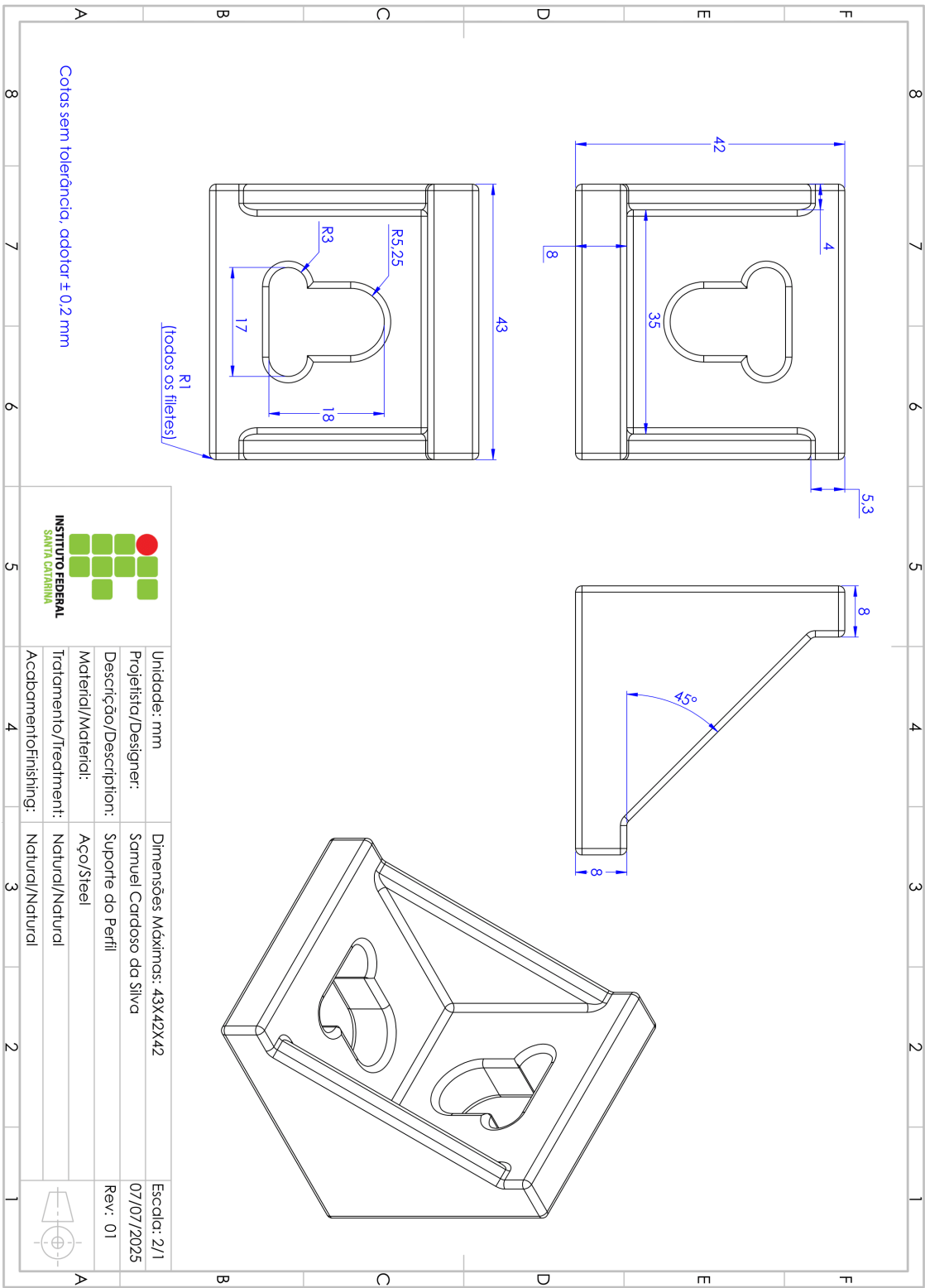
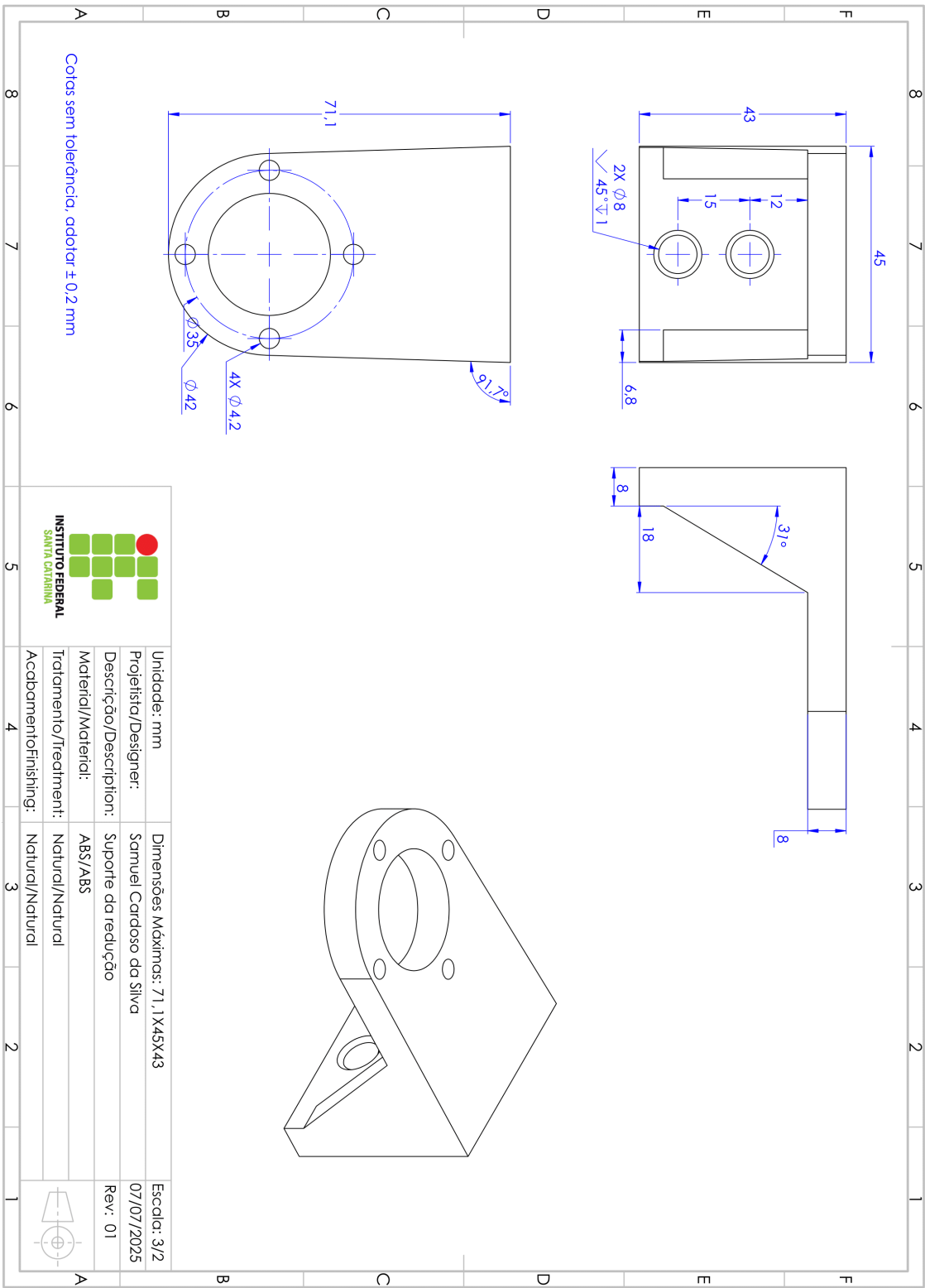


Figura 52 – DESENHOS TÉCNICOS-03.



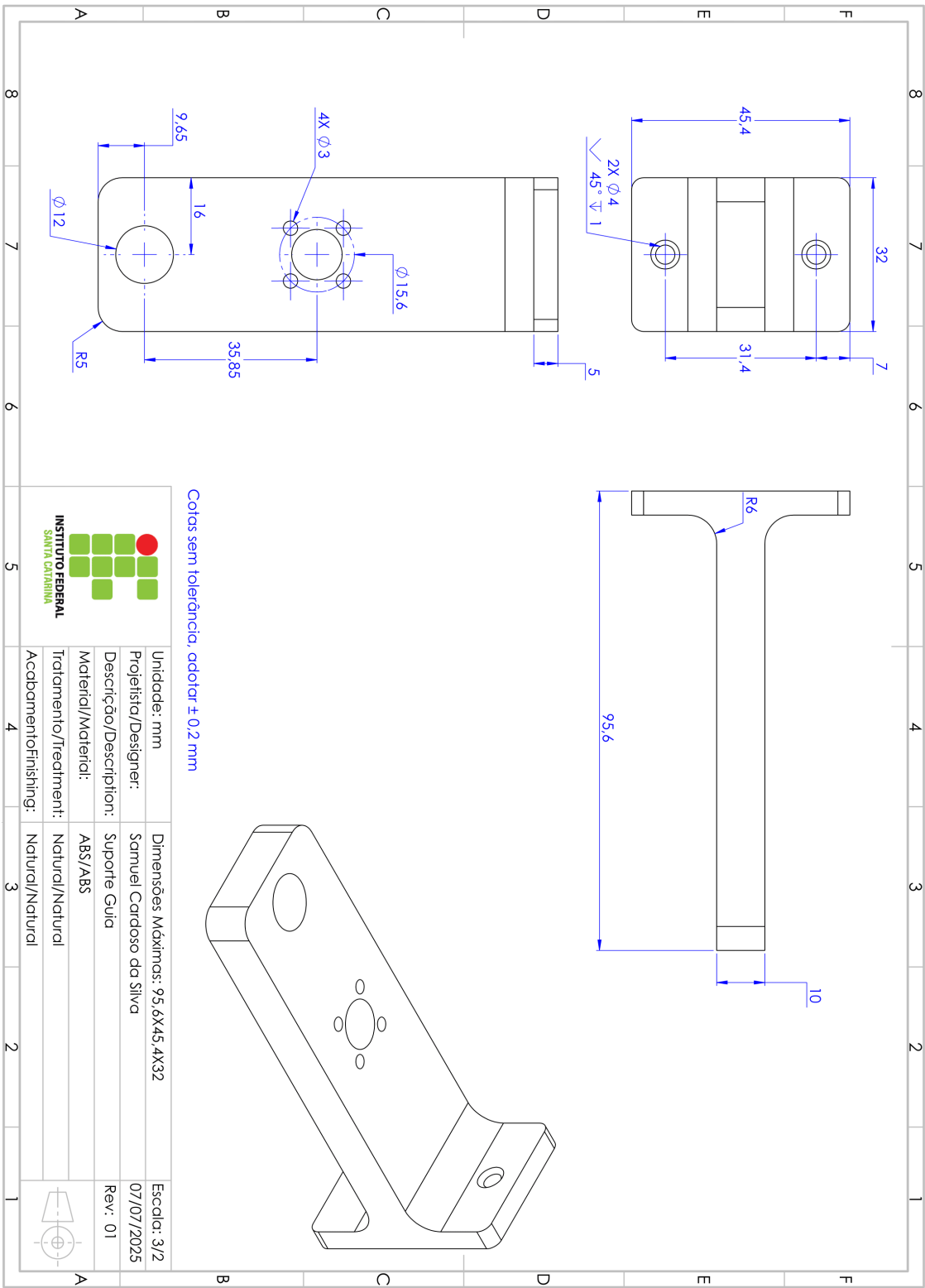
Fonte: Autor.

Figura 53 – DESENHOS TÉCNICOS-04.



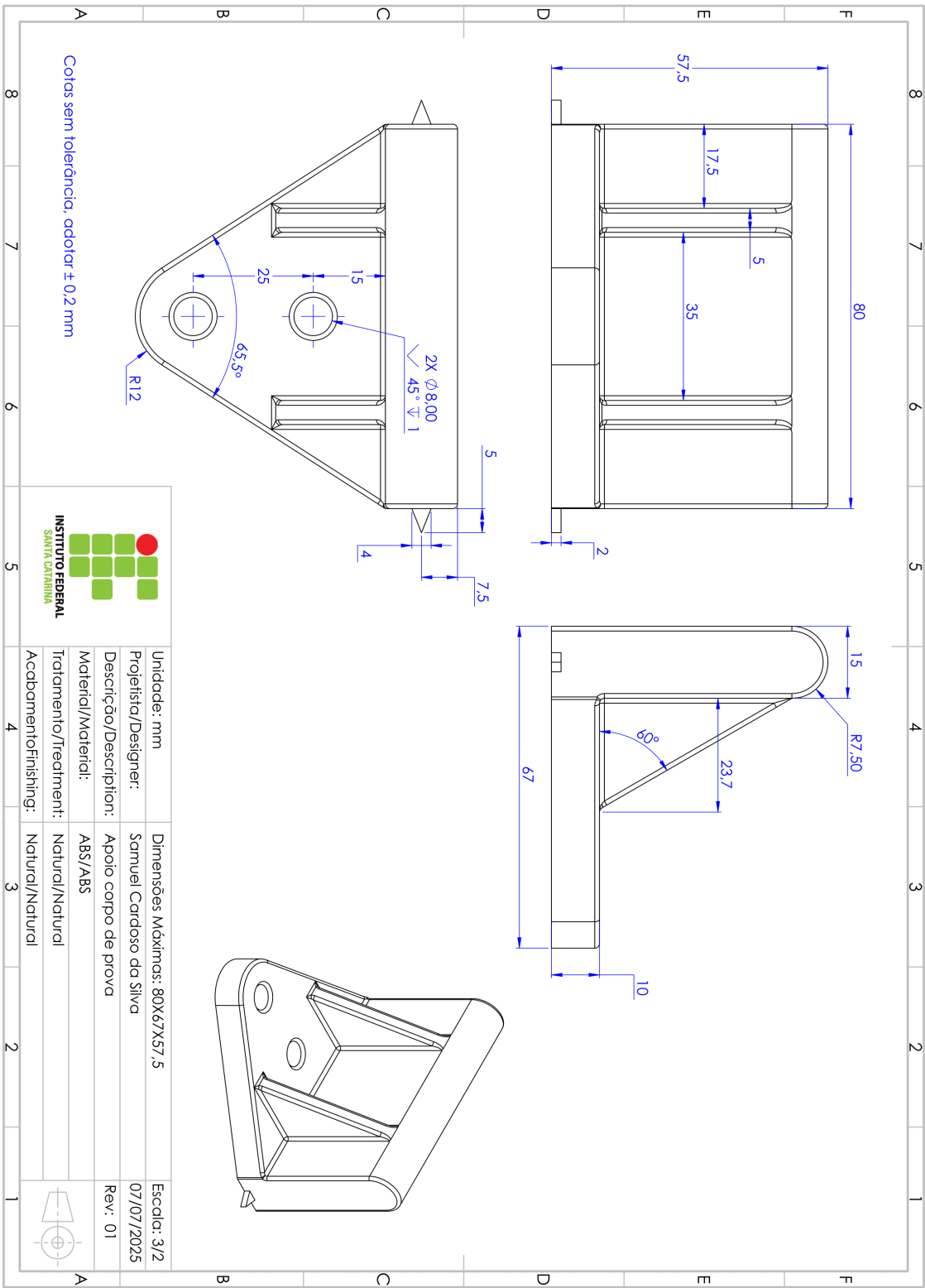
Fonte: Autor.

Figura 54 – DESENHOS TÉCNICOS-05.



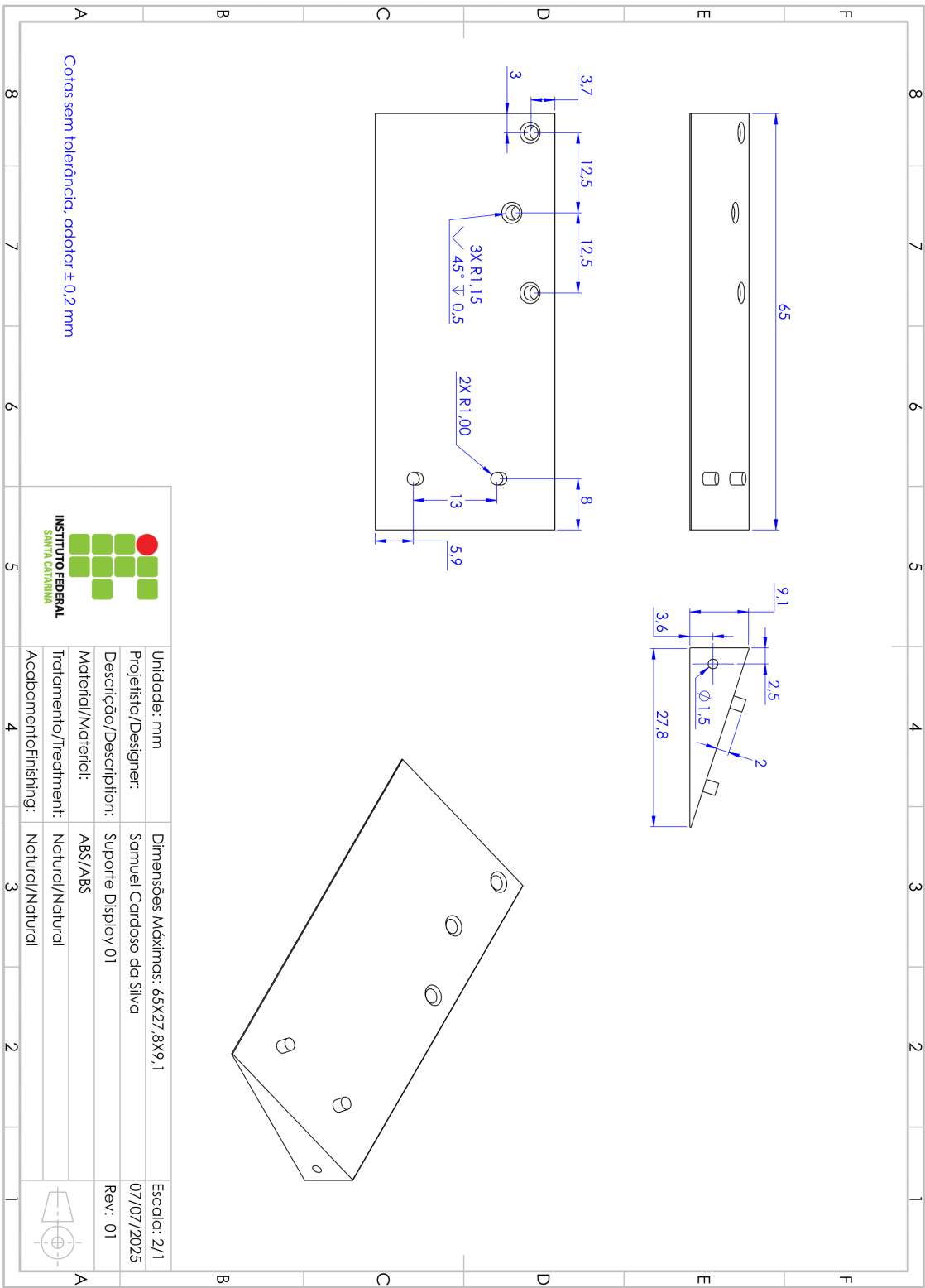
Fonte: Autor.

Figura 55 – DESENHOS TÉCNICOS-06.



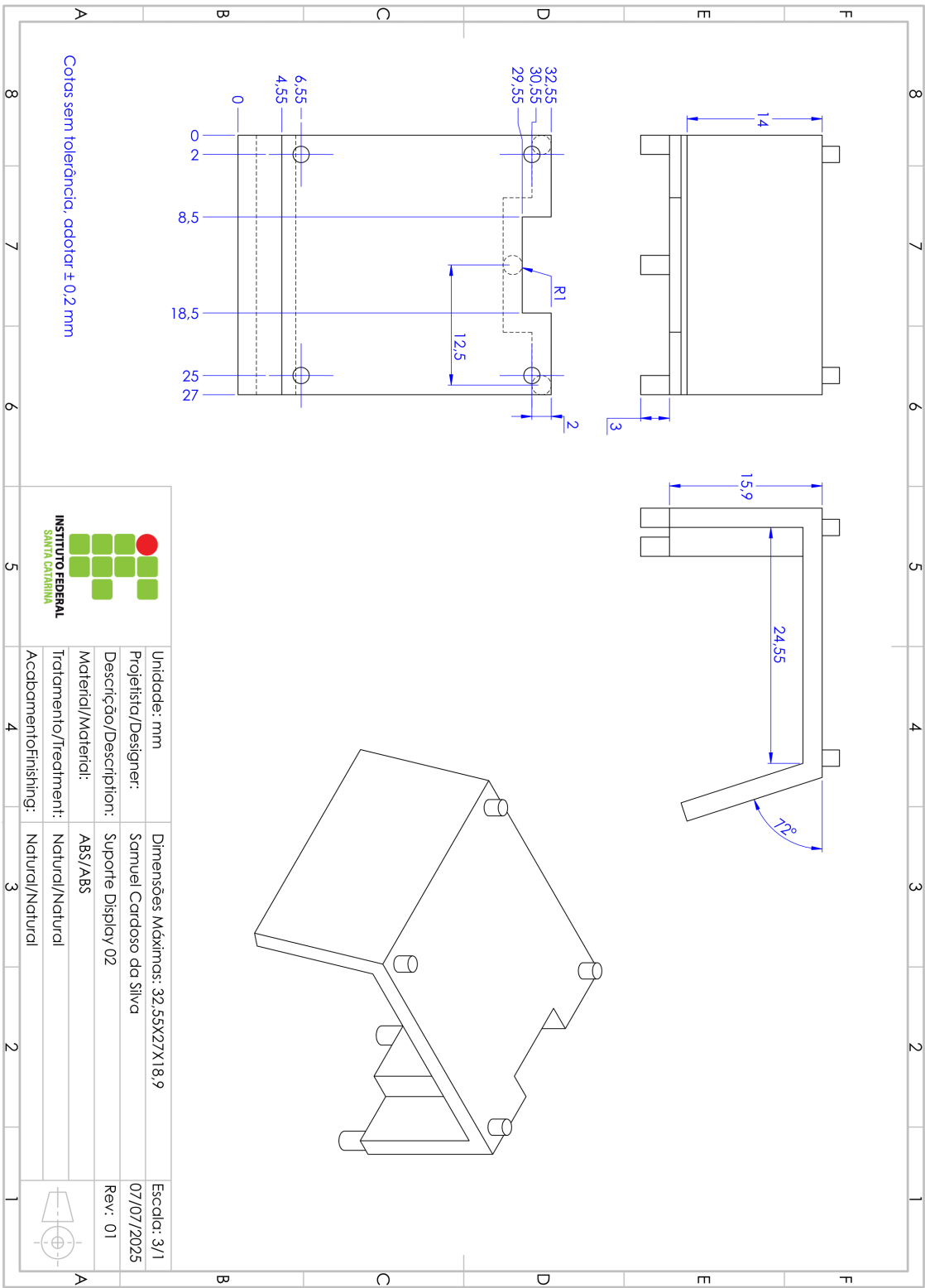
Fonte: Autor.

Figura 56 – DESENHOS TÉCNICOS-07.



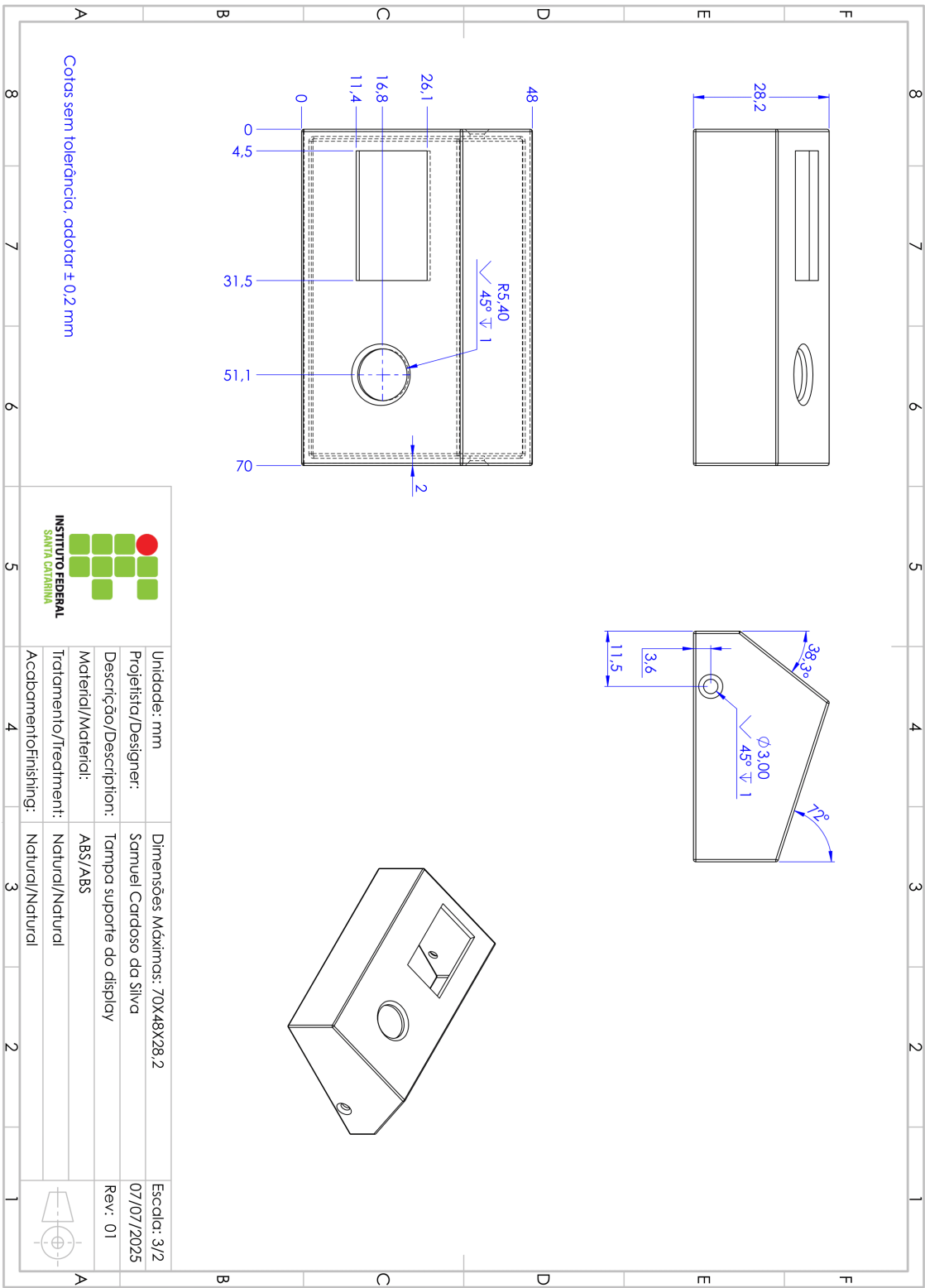
Fonte: Autor.

Figura 57 – DESENHOS TÉCNICOS-08.



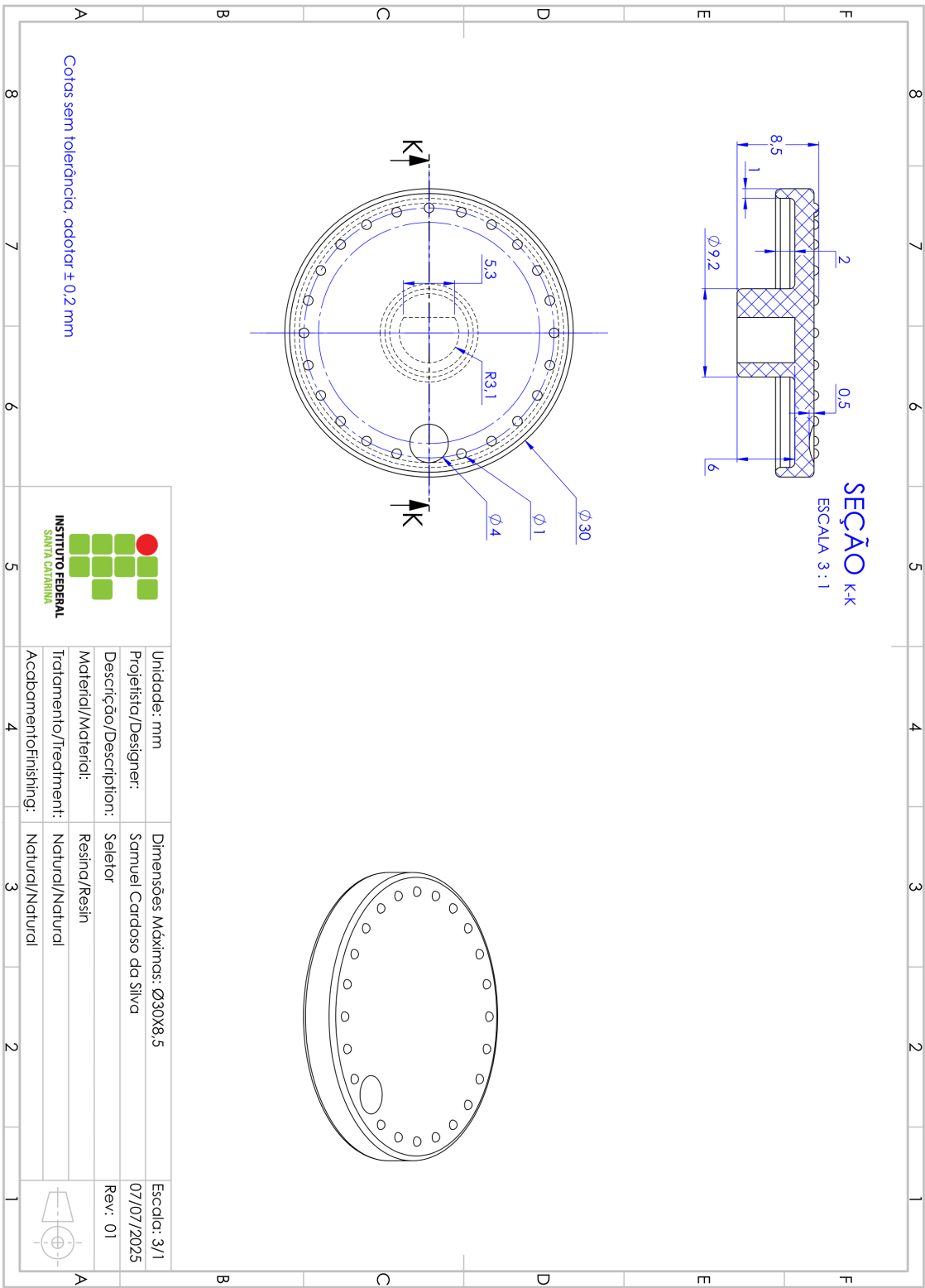
Fonte: Autor.

Figura 58 – DESENHOS TÉCNICOS-09.



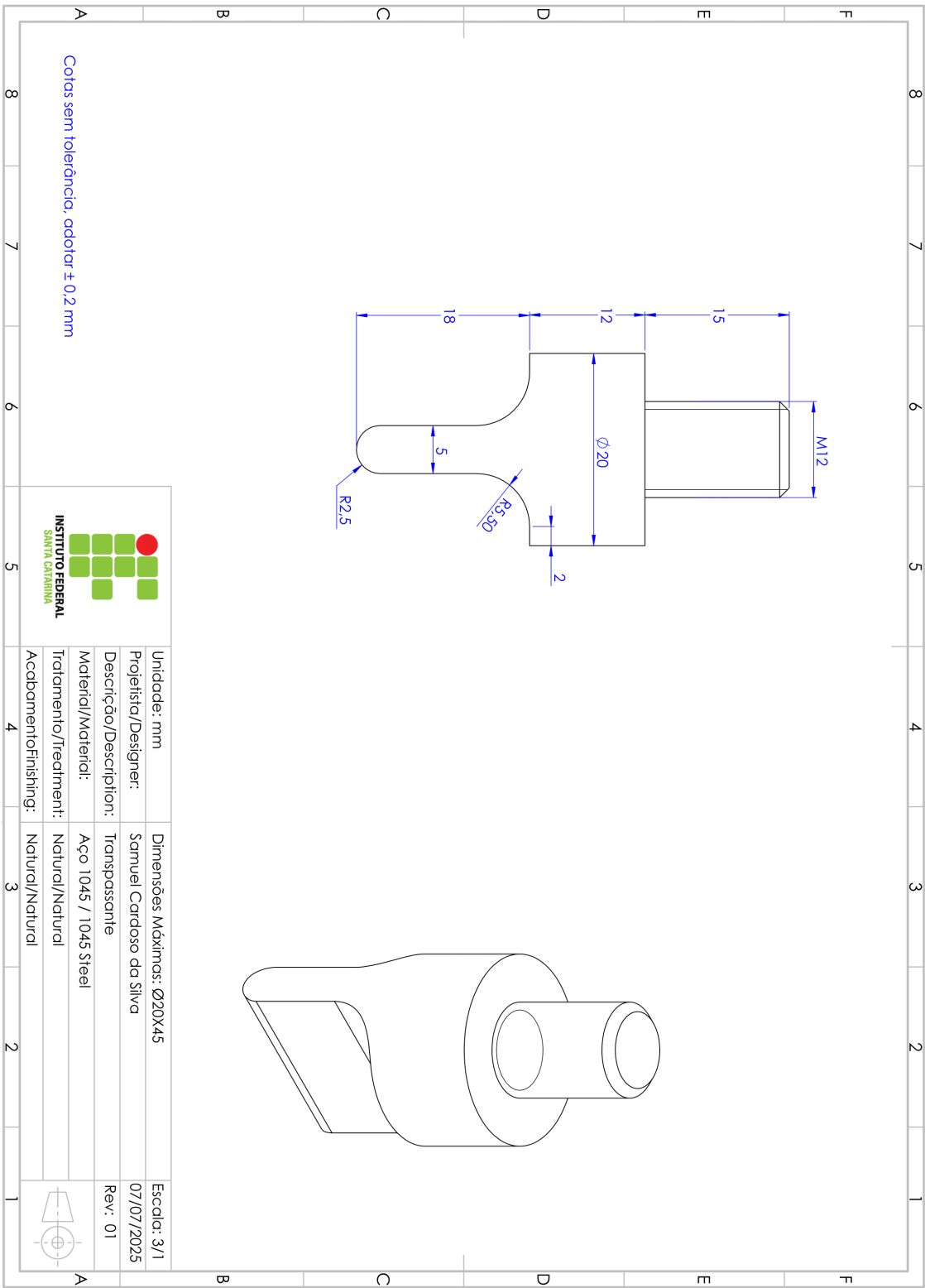
Fonte: Autor.

Figura 59 – DESENHOS TÉCNICOS-10.



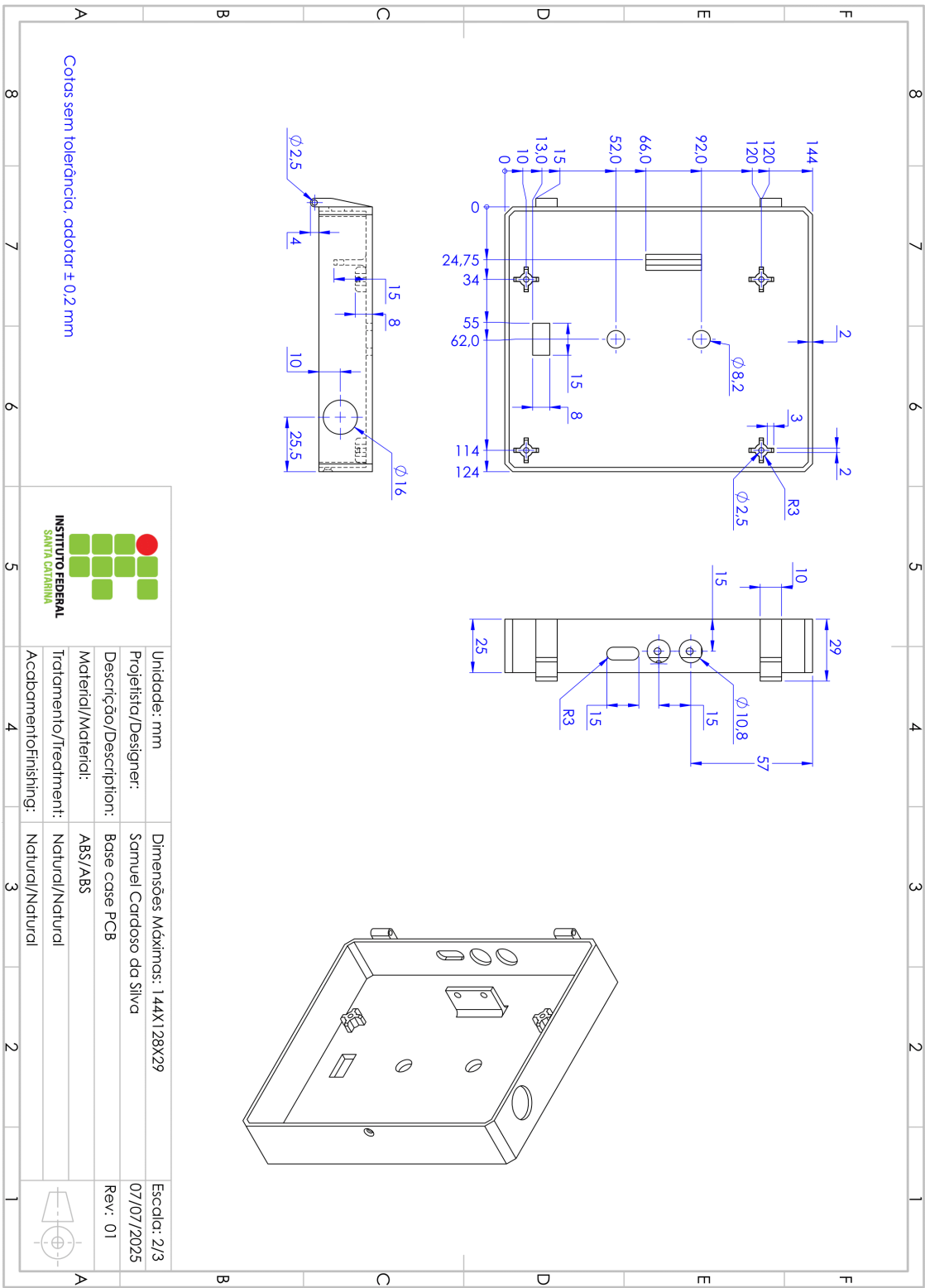
Fonte: Autor.

Figura 60 – DESENHOS TÉCNICOS-11.



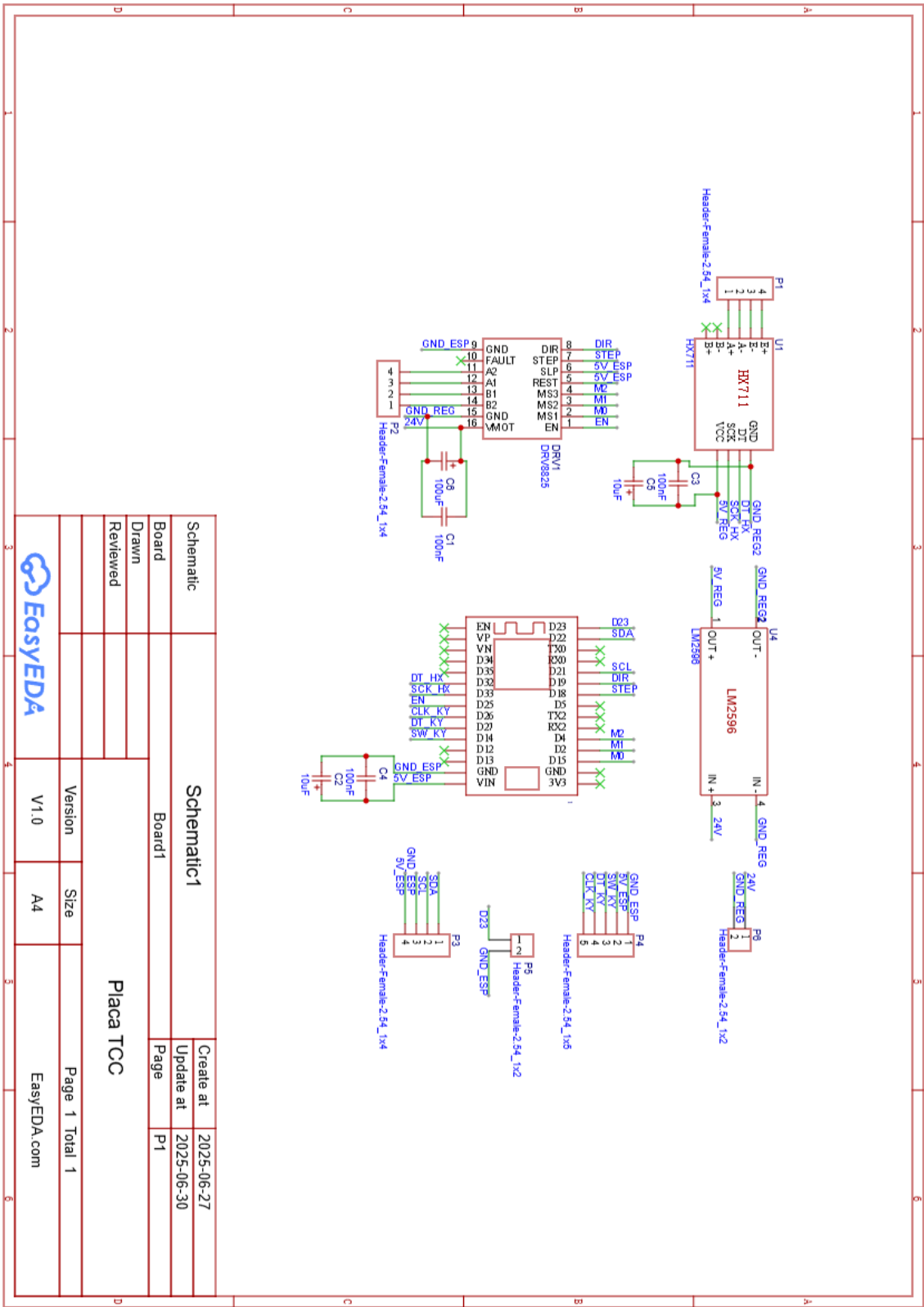
Fonte: Autor.

Figura 61 – DESENHOS TÉCNICOS-12.



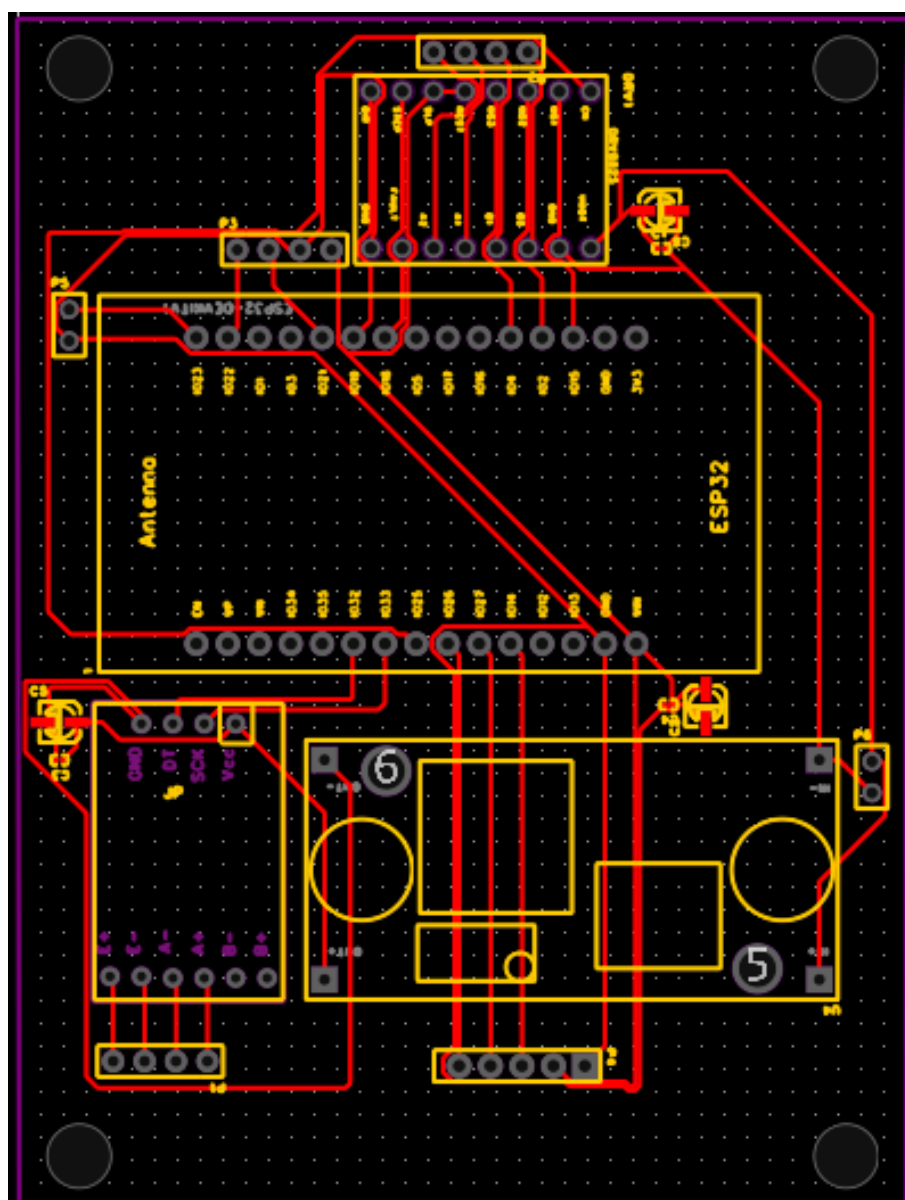
Fonte: Autor.

Figura 63 – Esquemático PCB.



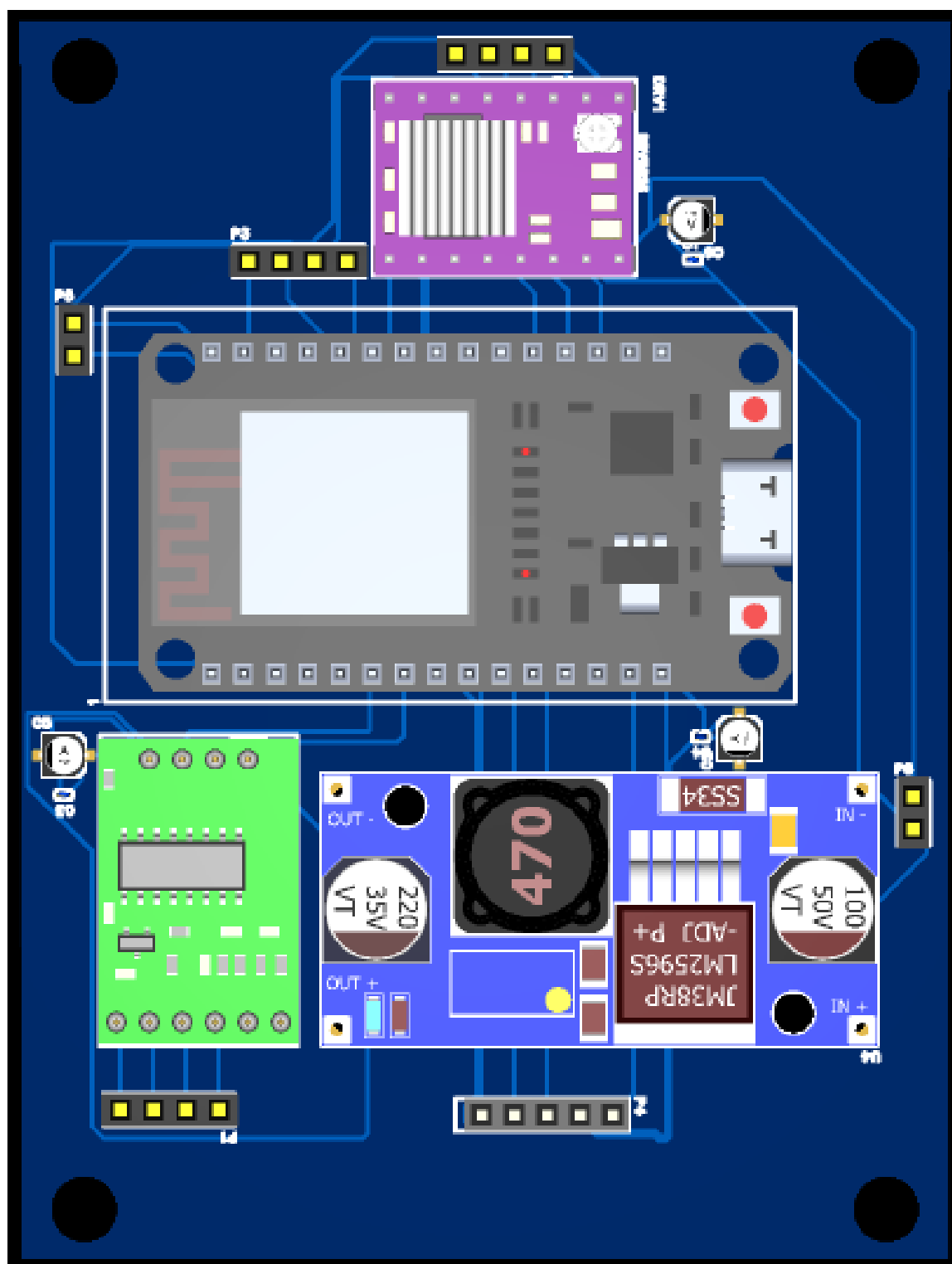
Fonte: Autor.

Figura 64 – layout PCB.



Fonte: Autor.

Figura 65 – 3D PCB.



Fonte: Autor.

APÊNDICE B – CÓDIGOS

```

21
22 #include <Wire.h>
23 #include <Adafruit_GFX.h>
24 #include <Adafruit_SSD1306.h>
25 #include <AiEsp32RotaryEncoder.h>
26 #include <AccelStepper.h>
27 #include "HX711.h"
28 #include <Ticker.h>
29 #include "esp_task_wdt.h"
30 #include <math.h>
31
32 // === OLED ===
33 #define SCREEN_WIDTH 128
34 #define SCREEN_HEIGHT 64
35 #define OLED_RESET -1
36 Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);
37
38 // === ENCODER ===
39 #define ENCODER_CLK 26
40 #define ENCODER_DT 27
41 #define ENCODER_SW 14
42 AiEsp32RotaryEncoder encoder(ENCODER_CLK, ENCODER_DT, ENCODER_SW, -1, 4);
43
44 // === MOTOR ===
45 #define STEP_PIN 18
46 #define DIR_PIN 19
47 #define ENABLE_PIN 25
48 #define M0 15
49 #define M1 2
50 #define M2 4
51 #define FIM_DE_CURSO_PIN 23
52
53 // === CÉLULA DE CARGA ===
54 #define LOADCELL_DOUT_PIN 32
55 #define LOADCELL_SCK_PIN 33
56
57 // === TIMER ===
58 #define TEMPO_WDT 60 * 5000 // tempo em milissegundos
59
60 // Modo DRIVER: 1 = driver com STEP + DIR
61 AccelStepper stepper(AccelStepper::DRIVER, STEP_PIN, DIR_PIN);
62
63 // === MENUS ===
64 String mainMenu[] = { "REALIZAR ENSAIO", "AJUSTES" };
65 String ensaioMenu[] = { "ESCOLHER NORMA", "< VOLTAR" };
66 String ajustesMenu[] = { "HOME", "AJUSTAR POSICAO", "< VOLTAR" };
67 String normaMenu[] = { "ASTM D790", "ISO 178", "< VOLTAR" };
68 String astmMenu[] = { "ESPESSURA CP:", "COMPRIMENTO DO APOIO:", "VELOCIDADE
    ENSAIO:", "DEFORMACAO FINAL:", "PROSSEGUIR PARA ENSAIO >", "< VOLTAR" };

```

```

69 String isoMenu[] = { "ESPESSURA CP:", "APOIO SUGERIDO:", "APOIO PADRAO:", "
    VELOCIDADE ENSAIO:", "RAIO APOIOS/CARGA:", "DEFORMACAO FINAL:", "
    PROSSEGUIR PARA ENSAIO >", "< VOLTAR" };
70 String velocidadeMenu[] = { "RIGIDO", "FLEXIVEL" };
71 String homeMenu[] = { "REALIZAR ROTINA?", "< VOLTAR" };
72
73 // === VARIÁVEIS MENU ===
74 int selected = 0;
75 int topVisible = 0;
76 int menuLength = 0;
77 float espessuraCP = 3.2;
78 bool adjustingEspessura = false;
79 bool adjustingDeformacao01 = false;
80 bool adjustingDeformacao02 = false;
81 bool choosingVelocidade = false;
82 bool choosingVelocidadeISO = false;
83 bool modosSimNao = true;
84 bool selectedSim = true;
85 bool selectedNao = true;
86 bool lastButtonState = HIGH;
87 bool lastButtonState02 = HIGH;
88 float deformacaoFinal01 = 3.5;
89 float deformacaoFinal02 = 5;
90 String velocidadeEnsaioISO = "2 mm/min";
91
92 // === VARIÁVEIS ENSAIO ===
93 long ultimaPosicao = 0;
94 float deslocamentoEnsaio01;
95 float deslocamentoEnsaio02;
96 float velocidadeEnsaio02;
97 bool frasesEnsaio = false;
98 const int TOTAL_PASSOS = 36000;
99 HX711 scale;
100 float leituraCarga = 0;
101 volatile bool pausaPorCarga = false;
102 const float LIMAR_CARGA = 15.0; // limite em gramas
103 float leituraAtual;
104 volatile bool Estado = false;
105 unsigned long ultimoPrint = 0;
106 const unsigned long intervaloPrint = 500; // intervalo em ms entre os prints
107 volatile bool quedaDeCargaDetectada = false;
108 volatile bool velISO = true;
109 volatile bool tipoEnsaio = true;
110 volatile bool ensaioASTMfinalizado = false;
111 volatile bool ensaioISOfinalizado = false;
112 volatile float cargaDuranteEnsaio = 0;
113 float ultimaLeituraCarga = 0;
114 Ticker tickerCarga;
115
116 enum MenuState {
117     MAIN,

```

```
118     ENSAIO,
119     AJUSTES,
120     NORMA,
121     ASTM,
122     ISO,
123     VELOCIDADE_ISO,
124     HOME
125 };
126
127 MenuState currentMenu = MAIN;
128
129 unsigned long scrollStart = 0;
130 int scrollOffset = 0;
131 const int scrollSpeed = 25;
132
133 void drawCenterValue(String value) {
134     display.clearDisplay();
135     display.setTextSize(2);
136     display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
137     int16_t x1, y1;
138     uint16_t w, h;
139     display.getTextBounds(value, 0, 0, &x1, &y1, &w, &h);
140     display.setCursor((SCREEN_WIDTH - w) / 2, (SCREEN_HEIGHT - h) / 2);
141     display.println(value);
142     display.display();
143 }
144
145 String getRaioApoios(float espessura) {
146     if (espessura <= 2.0) return "1.0 - 1.5 mm";
147     if (espessura <= 3.5) return "1.5 - 2.5 mm";
148     if (espessura <= 5.0) return "2.0 - 3.0 mm";
149     if (espessura <= 7.0) return "3.0 - 4.0 mm";
150     return "4.0 - 5.0 mm";
151 }
152
153 void simnao() {
154
155     display.clearDisplay();
156
157     switch (frasesEnsaio) {
158         case false:
159             {
160
161                 display.setTextSize(1);
162                 display.setTextColor(WHITE);
163                 int16_t x1, y1;
164                 uint16_t w, h;
165                 display.getTextBounds("notou contato?", 0, 0, &x1, &y1, &w, &h);
166                 display.setCursor((SCREEN_WIDTH - w) / 2, (SCREEN_HEIGHT - h) / 2 -
167                     10);
168                 display.print("notou contato?");
169             }
170     }
171 }
```

```
168         break;
169     }
170
171     case true:
172     {
173
174         display.setTextSize(1);
175         display.setTextColor(WHITE);
176         int16_t x1, y1;
177         uint16_t w, h;
178         display.getTextBounds("iniciar ensaio?", 0, 0, &x1, &y1, &w, &h);
179         display.setCursor((SCREEN_WIDTH - w) / 2, (SCREEN_HEIGHT - h) / 2 -
180 10);
181         display.print("iniciar ensaio?");
182         break;
183     }
184
185
186     display.setTextSize(2);
187
188     if (selectedSim) {
189         display.setTextColor(BLACK, WHITE); // SIM selecionado
190         display.setCursor(20, SCREEN_HEIGHT - 20);
191         display.print("SIM");
192
193         display.setTextColor(WHITE);
194         display.setCursor(80, SCREEN_HEIGHT - 20);
195         display.print("NAO");
196     } else {
197         display.setTextColor(WHITE);
198         display.setCursor(20, SCREEN_HEIGHT - 20);
199         display.print("SIM");
200
201         display.setTextColor(BLACK, WHITE); // NAO selecionado
202         display.setCursor(80, SCREEN_HEIGHT - 20);
203         display.print("NAO");
204     }
205
206     display.display();
207 }
208
209 void realizarHome() {
210     drawCenterValue("HOMING");
211     digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW); // Ativa driver
212
213     // Etapa 1: afasta do fim de curso (caso esteja pressionado)
214     stepper.setMaxSpeed(2000);
215     stepper.setAcceleration(1800);
216     stepper.move(2500); // Move para "baixo".
217 }
```

```
218 while (stepper.distanceToGo() != 0) {
219     stepper.run();
220     esp_task_wdt_reset();
221 }
222
223 delay(1000); // pausa leve antes do homing
224
225 // Etapa 2: vai em direção ao fim de curso
226 stepper.setMaxSpeed(2000);
227 stepper.setAcceleration(1800);
228 stepper.moveTo(-40000); // grande valor negativo, até bater
229
230 while (digitalRead(FIM_DE_CURSO_PIN) == HIGH) {
231     stepper.run();
232     esp_task_wdt_reset();
233 }
234
235 // Parada brusca ao detectar o fim de curso
236 stepper.setSpeed(0); // força parada imediata
237 stepper.setCurrentPosition(0); // zera posição após home
238 digitalWrite(ENABLE_PIN, HIGH);
239 }
240
241 void Ticker() {
242     switch (Estado) {
243
244         case false:
245             delay(1);
246             leituraCarga = scale.get_units();
247             pausaPorCarga = (leituraCarga >= LIMIAR_CARGA);
248             break;
249
250         case true:
251             delay(1);
252             leituraAtual = scale.get_units();
253             if ((ultimaLeituraCarga - leituraAtual) > 1000.0) {
254                 quedaDeCargaDetectada = true;
255             }
256             ultimaLeituraCarga = leituraAtual;
257             break;
258     }
259 }
260
261 void ensaioISO() {
262     delay(500);
263     digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW);
264     stepper.setMaxSpeed(2000);
265     stepper.setAcceleration(1800);
266     drawCenterValue("ZERANDO");
267
268     while (ensaioISOfinalizado == false) {
```

```
269     esp_task_wdt_reset();
270
271     if (pausaPorCarga) {
272         if (!processarContato()) {
273             pausaPorCarga = false;
274             return;
275         }
276         while (true) {
277             esp_task_wdt_reset();
278             delay(100);
279             break;
280         }
281     }
282
283     if (stepper.currentPosition() < TOTAL_PASSOS) {
284         stepper.moveTo(TOTAL_PASSOS);
285         stepper.run();
286         ultimaPosicao = stepper.currentPosition();
287
288     } else {
289         display.clearDisplay();
290         delay(1);
291         display.display();
292         tickerCarga.detach();
293         stepper.setSpeed(0);
294         stepper.setCurrentPosition(0);
295         drawCenterValue("ABORTANDO");
296         delay(1000);
297         stepper.setMaxSpeed(2000);
298         stepper.setAcceleration(1800);
299         stepper.moveTo(-100000);
300
301         while (digitalRead(FIM_DE_CURSO_PIN) == HIGH) {
302             stepper.run();
303             esp_task_wdt_reset();
304         }
305
306         stepper.setSpeed(0);
307         stepper.setCurrentPosition(0);
308         ensaioISOfinalizado = true;
309     }
310 }
311 digitalWrite(ENABLE_PIN, HIGH);
312 drawMenu();
313 }
314
315 void ensaioASTM() {
316     delay(500);
317     digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW);
318     stepper.setMaxSpeed(2000);
319     stepper.setAcceleration(1800);
```

```
320 drawCenterValue("ZERANDO");
321
322 while (ensaioASTMfinalizado == false) {
323     esp_task_wdt_reset();
324
325     if (pausaPorCarga) {
326         if (!processarContato()) {
327             pausaPorCarga = false;
328             return;
329         }
330         while (true) {
331             esp_task_wdt_reset();
332             delay(100);
333             break;
334         }
335     }
336
337     if (stepper.currentPosition() < TOTAL_PASSOS) {
338         stepper.moveTo(TOTAL_PASSOS);
339         stepper.run();
340         ultimaPosicao = stepper.currentPosition();
341     } else {
342
343         display.clearDisplay();
344         delay(1);
345         display.display();
346         tickerCarga.detach();
347         stepper.setSpeed(0);
348         stepper.setCurrentPosition(0);
349         drawCenterValue("ABORTANDO");
350         delay(1000);
351         stepper.setMaxSpeed(2000);
352         stepper.setAcceleration(1800);
353         stepper.moveTo(-100000);
354
355         while (digitalRead(FIM_DE_CURSO_PIN) == HIGH) {
356             stepper.run();
357             esp_task_wdt_reset();
358         }
359
360         stepper.setSpeed(0);
361         stepper.setCurrentPosition(0);
362         ensaioASTMfinalizado = true;
363     }
364 }
365
366 digitalWrite(ENABLE_PIN, HIGH);
367 drawMenu();
368 }
369
370 bool processarContato() {
```

```
371
372 display.clearDisplay();
373 display.display();
374 simnao();
375
376 int lastCLKState = digitalRead(ENCODER_CLK);
377
378 while (true) {
379
380     int currentCLKState = digitalRead(ENCODER_CLK);
381
382     // Detecta rotação
383     if (currentCLKState != lastCLKState && currentCLKState == LOW) {
384         if (digitalRead(ENCODER_DT) != currentCLKState) {
385             selectedSim = false;
386         } else {
387             selectedSim = true;
388         }
389         simnao();
390         delay(150); // debounce simples
391     }
392
393     lastCLKState = currentCLKState;
394
395     bool currentButtonState = digitalRead(ENCODER_SW);
396     if (lastButtonState == HIGH && currentButtonState == LOW) {
397         // Clique detectado
398         if (selectedSim) {
399             frasesEnsaio = true;
400             break;
401         } else {
402             stepper.setSpeed(0);
403             stepper.setCurrentPosition(ultimaPosicao);
404             stepper.setMaxSpeed(500);
405             stepper.setAcceleration(1500);
406             drawCenterValue("ZERANDO");
407             return true;
408         }
409         delay(300); // Debounce
410     }
411     lastButtonState = currentButtonState;
412
413     esp_task_wdt_reset();
414     delay(10);
415 }
416
417 display.clearDisplay();
418 display.display();
419 simnao();
420 lastCLKState = digitalRead(ENCODER_CLK);
421 delay(500);
```

```
422 while (true) {
423
424     int currentCLKState02 = digitalRead(ENCODER_CLK);
425
426     // Detecta rotação
427     if (currentCLKState02 != lastCLKState && currentCLKState02 == LOW) {
428         if (digitalRead(ENCODER_DT) != currentCLKState02) {
429             selectedSim = false;
430         } else {
431             selectedSim = true;
432         }
433         simnao();
434         delay(150); // debounce simples
435     }
436
437     lastCLKState = currentCLKState02;
438
439     bool currentButtonState02 = digitalRead(ENCODER_SW);
440     if (lastButtonState02 == HIGH && currentButtonState02 == LOW) {
441         // Clique detectado
442         if (selectedSim) {
443             frasesEnsaio = false;
444             break;
445         } else {
446             stepper.setSpeed(0);
447             stepper.setCurrentPosition(0);
448             drawCenterValue("ABORTANDO");
449             delay(1000);
450             stepper.setMaxSpeed(2000);
451             stepper.setAcceleration(1800);
452             stepper.moveTo(-100000);
453
454             while (digitalRead(FIM_DE_CURSO_PIN) == HIGH) {
455                 stepper.run();
456                 esp_task_wdt_reset();
457             }
458
459             stepper.setSpeed(0);
460             stepper.setCurrentPosition(0);
461
462             return false;
463         }
464
465         delay(300); // Debounce
466     }
467
468     lastButtonState02 = currentButtonState02;
469
470     esp_task_wdt_reset();
471     delay(10);
472 }
```

```
473
474 //ativando microstepping 1/32;
475 digitalWrite(M0, HIGH);
476 digitalWrite(M1, LOW);
477 digitalWrite(M2, HIGH);
478
479 tickerCarga.detach();
480 Estado = true;
481 quedaDeCargaDetectada = false;
482 long alvo;
483 long velocidadealvo;
484
485 switch (tipoEnsaio) {
486     case true:
487
488         deslocamentoEnsaio02 = (((deformacaoFinal02 / 100) * pow(espessuraCP *
489         16, 2)) / (6 * espessuraCP));
490         velocidadeEnsaio02 = ((0.01 * pow(espessuraCP * 16, 2)) / (6 *
491         espessuraCP));
492         velocidadealvo = velocidadeEnsaio02 * 272;
493         alvo = deslocamentoEnsaio02 * 15250;
494         stepper.setMaxSpeed(velocidadealvo);
495         stepper.setAcceleration(1000);
496         break;
497
498     case false:
499
500         deslocamentoEnsaio01 = (((deformacaoFinal01 / 100) * pow(espessuraCP *
501         16, 2)) / (6 * espessuraCP));
502         if (velISO == true) {
503             velocidadealvo = 2 * 272;
504         } else {
505             velocidadealvo = 10 * 272;
506         }
507         alvo = deslocamentoEnsaio01 * 15250;
508         stepper.setMaxSpeed(velocidadealvo);
509         stepper.setAcceleration(1000);
510         break;
511     }
512
513     display.clearDisplay();
514     delay(1);
515     display.display();
516     drawCenterValue("ENSAIANDO...");
517
518     delay(1);
519     scale.tare();
520     delay(1);
521     tickerCarga.attach_ms(50, Ticker);
522
523     Serial.println("INICIO_TESTE");
```

```
521 while (stepper.currentPosition() < alvo) {
522     delay(1);
523     if (millis() - ultimoPrint >= intervaloPrint) {
524         ultimoPrint = millis();
525         Serial.println(leituraAtual);
526     }
527
528     if (quedaDeCargaDetectada) {
529         break;
530     }
531
532     stepper.moveTo(alvo);
533     stepper.run();
534     esp_task_wdt_reset();
535 }
536
537 stepper.setSpeed(0); // força parada imediata
538 stepper.setCurrentPosition(0); // zera posição após home
539 tickerCarga.detach();
540
541 display.clearDisplay();
542 display.display();
543 drawCenterValue("ENSAIO FINALIZADO!");
544
545 digitalWrite(M0, LOW);
546 digitalWrite(M1, LOW);
547 digitalWrite(M2, LOW);
548 ensaioASTMfinalizado = true;
549 ensaioISOfinalizado = true;
550 Estado = false;
551
552 delay(5000);
553 stepper.setMaxSpeed(2000);
554 stepper.setAcceleration(1800);
555 stepper.moveTo(-100000); // grande valor negativo, até bater
556
557 while (digitalRead(FIM_DE_CURSO_PIN) == HIGH) {
558     stepper.run();
559     esp_task_wdt_reset();
560 }
561
562 // Parada brusca ao detectar o fim de curso
563 stepper.setSpeed(0); // força parada imediata
564 stepper.setCurrentPosition(0);
565
566 return true;
567 }
568
569 void drawMenu() {
570     if (adjustingEspessura) {
571         drawCenterValue(String(espessuraCP, 1) + " mm");
```

```
572     return;
573 }
574 if (adjustingDeformacao01) {
575     drawCenterValue(String(deformacaoFinal01, 1) + "%");
576     return;
577 }
578 if (adjustingDeformacao02) {
579     drawCenterValue(String(deformacaoFinal02, 1) + "%");
580     return;
581 }
582 if (choosingVelocidadeISO) {
583     drawCenterValue(velocidadeMenu[selected]);
584     return;
585 }
586
587 display.clearDisplay();
588 display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
589
590 display.setTextSize(2);
591 int16_t x1, y1;
592 uint16_t w, h;
593
594 String title = "MENU";
595 if (currentMenu == ENSAIO || currentMenu == NORMA || currentMenu == ASTM ||
596     currentMenu == ISO || currentMenu == VELOCIDADE_ISO) title = "ENSAIO";
597 display.getTextBounds(title, 0, 0, &x1, &y1, &w, &h);
598 display.setCursor((SCREEN_WIDTH - w) / 2, 0);
599 display.println(title);
600
601 display.drawLine(0, 17, SCREEN_WIDTH, 17, SSD1306_WHITE);
602
603 display.setTextSize(2);
604 int y = 20;
605 int maxVisible = 2;
606
607 String* menuItems;
608 switch (currentMenu) {
609     case MAIN:
610         menuItems = mainMenu;
611         menuLength = 2;
612         break;
613     case ENSAIO:
614         menuItems = ensaioMenu;
615         menuLength = 2;
616         break;
617     case AJUSTES:
618         menuItems = ajustesMenu;
619         menuLength = 3;
620         break;
621     case NORMA:
622         menuItems = normaMenu;
```

```

622     menuLength = 3;
623     break;
624 case ASTM:
625     menuItems = astmMenu;
626     menuLength = 6;
627     break;
628 case ISO:
629     menuItems = isoMenu;
630     menuLength = 8;
631     break;
632 case VELOCIDADE_ISO:
633     menuItems = velocidadeMenu;
634     menuLength = 2;
635     break;
636 case HOME:
637     menuItems = homeMenu;
638     menuLength = 2;
639     break;
640 }
641
642 for (int i = 0; i < maxVisible && (i + topVisible) < menuLength; i++) {
643     int index = i + topVisible;
644     String label = menuItems[index];
645     int charWidth = 12;
646
647     if (currentMenu == ASTM) {
648         if (label == "ESPESSURA CP:") label += " " + String(espessuraCP, 1) + "
649 mm";
650         else if (label == "COMPRIMENTO DO APOIO:") label += " " + String(16 *
651 espessuraCP, 1) + " mm";
652         else if (label == "VELOCIDADE ENSAIO:") {
653             float L = 16 * espessuraCP;
654             float R = 0.01 * (L * L) / (6 * espessuraCP);
655             label += " " + String(R, 2) + " mm/min";
656         } else if (label == "DEFORMACAO FINAL:") label += " " + String(
657 deformacaoFinal02, 1) + "%";
658     } else if (currentMenu == ISO) {
659         if (label == "ESPESSURA CP:") label += " " + String(espessuraCP, 1) + "
660 mm";
661         else if (label == "APOIO SUGERIDO:") label += " " + String(16 *
662 espessuraCP, 1) + " mm";
663         else if (label == "APOIO PADRAO:") label += " 64 mm";
664         else if (label == "VELOCIDADE ENSAIO:") label += " " +
665 velocidadeEnsaioISO;
666         else if (label == "RAIO APOIOS/CARGA:") label += " " + getRaioApoios(
667 espessuraCP);
668         else if (label == "DEFORMACAO FINAL:") label += " " + String(
669 deformacaoFinal01, 1) + "%";
670     }
671
672     int textWidth = label.length() * charWidth;

```

```
665
666     if (index == selected) {
667         display.fillRect(0, y, SCREEN_WIDTH, 16, SSD1306_WHITE);
668         display.setTextColor(SSD1306_BLACK);
669
670         bool shouldScroll = !(label == "ASTM D790" || label == "ISO 178" ||
label == "RIGIDO" || label == "FLEXIVEL" || label.startsWith("< VOLTAR")
|| label.startsWith("HOME"));
671
672         if (shouldScroll) {
673             if (millis() - scrollStart > scrollSpeed) {
674                 scrollOffset++;
675                 if (scrollOffset > textWidth + charWidth * 3) scrollOffset = 0;
676                 scrollStart = millis();
677             }
678             String loopedLabel = label + "    " + label;
679             display.setCursor(-scrollOffset, y);
680             display.print(loopedLabel);
681         } else {
682             display.setCursor(0, y);
683             display.print(label);
684         }
685     } else {
686         display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
687         display.setCursor(0, y);
688         int maxChars = SCREEN_WIDTH / charWidth;
689         display.print(label.substring(0, maxChars));
690     }
691
692     y += 20;
693 }
694
695 display.display();
696 }
697
698 void IRAM_ATTR readEncoderISR() {
699     encoder.readEncoder_ISR();
700 }
701
702 void setup() {
703     Serial.begin(115200);
704
705     esp_task_wdt_deinit();
706
707     esp_task_wdt_config_t config = {
708         .timeout_ms = TEMPO_WDT,
709         .trigger_panic = true
710     };
711     esp_task_wdt_init(&config);
712     esp_task_wdt_add(NULL);
713 }
```

```
714 Wire.begin(22, 21);
715 if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
716     Serial.println("Display não encontrado");
717     while (true)
718         ;
719 }
720
721 display.clearDisplay();
722 display.display();
723
724 encoder.begin();
725 encoder.setup(readEncoderISR);
726 encoder.setAcceleration(0);
727
728 pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
729 pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
730 pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);
731 pinMode(FIM_DE_CURSO_PIN, INPUT_PULLUP);
732 pinMode(M0, OUTPUT);
733 pinMode(M1, OUTPUT);
734 pinMode(M2, OUTPUT);
735
736 //Modo full step
737 digitalWrite(M0, LOW);
738 digitalWrite(M1, LOW);
739 digitalWrite(M2, LOW);
740 digitalWrite(ENABLE_PIN, HIGH);
741
742 scale.begin(LoadCELL_DOUT_PIN, LoadCELL_SCK_PIN);
743 scale.set_scale(84);
744 scale.tare();
745
746 drawMenu();
747 }
748
749 void loop() {
750     long pos = encoder.readEncoder();
751     static long lastPos = pos;
752
753     if (adjustingEspessura || adjustingDeformacao01 || adjustingDeformacao02 ||
        choosingVelocidadeISO) {
754         if (pos != lastPos) {
755             if (adjustingEspessura) {
756                 espessuraCP += (pos > lastPos) ? 0.1 : -0.1;
757                 if (espessuraCP < 0.1) espessuraCP = 0.1;
758                 drawCenterValue(String(espessuraCP, 1) + " mm");
759             } else if (adjustingDeformacao01) {
760                 deformacaoFinal01 += (pos > lastPos) ? 0.1 : -0.1;
761                 if (deformacaoFinal01 < 0.1) deformacaoFinal01 = 0.1;
762                 drawCenterValue(String(deformacaoFinal01, 1) + "%");
763             } else if (adjustingDeformacao02) {
```

```

764     deformacaoFinal02 += (pos > lastPos) ? 0.1 : -0.1;
765     if (deformacaoFinal02 < 0.1) deformacaoFinal02 = 0.1;
766     drawCenterValue(String(deformacaoFinal02, 1) + "%");
767 } else if (choosingVelocidadeISO) {
768     selected += (pos > lastPos) ? 1 : -1;
769     if (selected < 0) selected = 1;
770     if (selected > 1) selected = 0;
771     drawCenterValue(velocidadeMenu[selected]);
772 }
773     lastPos = pos;
774 }
775 } else {
776     if (pos != lastPos) {
777         selected += (pos > lastPos) ? 1 : -1;
778         if (selected < 0) selected = menuLength - 1;
779         if (selected >= menuLength) selected = 0;
780
781         if (selected < topVisible) topVisible = selected;
782         else if (selected >= topVisible + 2) topVisible = selected - 1;
783
784         scrollOffset = 0;
785         scrollStart = millis();
786         drawMenu();
787         lastPos = pos;
788     }
789 }
790
791 if (encoder.isEncoderButtonClicked()) {
792     if ((currentMenu == ASTM || currentMenu == ISO) && selected == 0 && !
adjustingEspessura) {
793         adjustingEspessura = true;
794         drawCenterValue(String(espessuraCP, 1) + " mm");
795         return;
796     } else if (adjustingEspessura) {
797         adjustingEspessura = false;
798         drawMenu();
799         return;
800     }
801
802     if (currentMenu == ASTM && selected == 3 && !adjustingDeformacao02) {
803         adjustingDeformacao02 = true;
804         drawCenterValue(String(deformacaoFinal02, 1) + "%");
805         return;
806     } else if (adjustingDeformacao02) {
807         adjustingDeformacao02 = false;
808         drawMenu();
809         return;
810     }
811
812     if (currentMenu == ISO && selected == 5 && !adjustingDeformacao01) {
813         adjustingDeformacao01 = true;

```

```
814     drawCenterValue(String(deformacaoFinal01, 1) + "%");
815     return;
816 } else if (adjustingDeformacao01) {
817     adjustingDeformacao01 = false;
818     drawMenu();
819     return;
820 }
821
822 if (currentMenu == ISO && selected == 3 && !choosingVelocidadeISO) {
823     choosingVelocidadeISO = true;
824     currentMenu = VELOCIDADE_ISO;
825     selected = 0;
826     drawCenterValue(velocidadeMenu[selected]);
827     return;
828 } else if (choosingVelocidadeISO) {
829     if (selected == 0) {
830         velocidadeEnsaioISO = "2 mm/min";
831         velISO = true;
832     } else {
833         velocidadeEnsaioISO = "10 mm/min";
834         velISO = false;
835     }
836     choosingVelocidadeISO = false;
837     currentMenu = ISO;
838     drawMenu();
839     return;
840 }
841
842 switch (currentMenu) {
843     case MAIN:
844         if (selected == 0) {
845             currentMenu = ENSAIO;
846         } else if (selected == 1) {
847             currentMenu = AJUSTES;
848         }
849         break;
850     case ENSAIO:
851         if (selected == 0) {
852             currentMenu = NORMA;
853         } else if (selected == 1) {
854             currentMenu = MAIN;
855         }
856         break;
857     case AJUSTES:
858         if (selected == 0) {
859             currentMenu = HOME;
860         } else if (selected == 2) {
861             currentMenu = MAIN;
862         }
863         break;
864     case NORMA:
```

```
865     if (selected == 0) {
866         currentMenu = ASTM;
867     } else if (selected == 1) {
868         currentMenu = ISO;
869     } else if (selected == 2) {
870         currentMenu = ENSAIO;
871     }
872     break;
873 case ASTM:
874     if (selected == 5) { currentMenu = NORMA; }
875     if (selected == 4) {
876         tipoEnsaio = true;
877         ensaioASTMfinalizado = false;
878         realizarHome();
879         tickerCarga.attach_ms(50, Ticker);
880         ensaioASTM();
881     }
882     break;
883 case ISO:
884     if (selected == 7) { currentMenu = NORMA; }
885     if (selected == 6) {
886         tipoEnsaio = false;
887         ensaioISOfinalizado = false;
888         realizarHome();
889         tickerCarga.attach_ms(50, Ticker);
890         ensaioISO();
891     }
892     break;
893 case HOME:
894     if (selected == 0) {
895         realizarHome();
896         drawMenu();
897     } else if (selected == 1) {
898
899         currentMenu = AJUSTES;
900     }
901     break;
902 }
903
904 selected = 0;
905 topVisible = 0;
906 scrollOffset = 0;
907 scrollStart = millis();
908 drawMenu();
909 }
910
911 drawMenu();
912 }
```

Código B.1 – Código completo da giga

```
913
914 import serial
915 import threading
916 import matplotlib.pyplot as plt
917 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
918 import tkinter as tk
919 from tkinter import messagebox
920 from tkinter import ttk
921 import ttkbootstrap as tb
922 import csv
923
924 porta_serial = 'COM5'
925 baudrate = 115200
926 deslocamento_passo = 0.01088
927
928 forca_dados = []
929 deslocamento_dados = []
930 coletando = False
931 ser = None
932 leitura_ativa = False
933
934 def alternar_conexao():
935     global ser, leitura_ativa, thread_serial, coletando
936
937     if ser and ser.is_open:
938         leitura_ativa = False
939         ser.close()
940         botao_conexao.config(text="Conectar")
941         atualizar_led(False)
942         print("Desconectado.")
943     else:
944         try:
945             ser = serial.Serial()
946             ser.port = porta_serial
947             ser.baudrate = baudrate
948             ser.timeout = 1
949             ser.dtr = False
950             ser.rts = False
951             ser.open()
952             leitura_ativa = True
953             coletando = False
954             thread_serial = threading.Thread(target=ler_serial, daemon=True)
955             thread_serial.start()
956             botao_conexao.config(text="Desconectar")
957             atualizar_led(True)
958             print("Conectado.")
959         except serial.SerialException as e:
960             messagebox.showerror("Erro de conexão", str(e))
961             atualizar_led(False)
962
963 def ler_serial():
```

```
964     global coletando
965     while leitura_ativa:
966         try:
967             linha = ser.readline().decode('utf-8').strip()
968             if linha == 'INICIO_TESTE':
969                 coletando = True
970                 print("Coleta iniciada.")
971                 continue
972             if coletando:
973                 try:
974                     forca = float(linha)
975                     forca_dados.append(forca)
976                     deslocamento = len(forca_dados) * deslocamento_passo
977                     deslocamento_dados.append(deslocamento)
978                     print(forca)
979                     atualizar_grafico()
980                 except ValueError:
981                     pass
982         except:
983             break
984
985 def resetar_dados():
986     forca_dados.clear()
987     deslocamento_dados.clear()
988     atualizar_grafico()
989
990 def salvar_imagem():
991     figura.savefig("ensaio_flexao.png")
992     messagebox.showinfo("Imagem Salva", "Gráfico salvo como 'ensaio_flexao.png'.")
993
994 def salvar_csv():
995     with open("dados_ensaio.csv", "w", newline='') as f:
996         writer = csv.writer(f)
997         writer.writerow(["Deslocamento (mm)", "Força (g)"])
998         writer.writerows(zip(deslocamento_dados, forca_dados))
999     messagebox.showinfo("CSV Salvo", "Dados salvos como 'dados_ensaio.csv'.")
1000
1001 def atualizar_grafico():
1002     ax.clear()
1003     ax.set_title("Ensaio de Flexão")
1004     ax.set_xlabel("Deslocamento (mm)")
1005     ax.set_ylabel("Força (g)")
1006     ax.plot(deslocamento_dados, forca_dados, marker='o', linestyle='-')
1007     canvas.draw()
1008
1009 def atualizar_led(conectado: bool):
1010     color = '#00cc00' if conectado else '#cc0000'
1011     canvas_led.itemconfig(led, fill=color)
1012
1013 app = tb.Window(themename="flatly")
```

```
1014 app.title("Ensaio de Flexão Mecânica")
1015 app.geometry("900x500")
1016
1017 frame_grafico = ttk.Frame(app, padding=10, borderwidth=2, relief="groove")
1018 frame_grafico.grid(row=0, column=0, sticky="nsew", padx=(10,5), pady=10)
1019 app.grid_columnconfigure(0, weight=3)
1020 app.grid_rowconfigure(0, weight=1)
1021
1022 frame_botoes = ttk.Frame(app, padding=10)
1023 frame_botoes.grid(row=0, column=2, sticky="ns", padx=(10,10), pady=10)
1024 app.grid_columnconfigure(2, weight=1)
1025
1026 linha_vertical = tk.Frame(app, width=2, bg='grey80')
1027 linha_vertical.grid(row=0, column=1, sticky="ns", pady=10)
1028 app.grid_columnconfigure(1, minsize=2)
1029
1030 figura, ax = plt.subplots(figsize=(4.25, 3.4))
1031 from matplotlib.backends.backend_tkagg import NavigationToolbar2Tk
1032
1033 canvas = FigureCanvasTkAgg(figura, master=frame_grafico)
1034 canvas.get_tk_widget().pack(fill="both", expand=True)
1035
1036
1037 frame_toolbar = ttk.Frame(frame_grafico)
1038 frame_toolbar.pack(fill="x")
1039 toolbar = NavigationToolbar2Tk(canvas, frame_toolbar)
1040 toolbar.update()
1041
1042
1043
1044 frame_conectar = ttk.Frame(frame_botoes)
1045 frame_conectar.grid(row=0, column=0, pady=(0,20))
1046
1047 subframe_led = ttk.Frame(frame_conectar)
1048 subframe_led.pack(pady=(0, 5))
1049
1050 canvas_led = tk.Canvas(subframe_led, width=30, height=30, highlightthickness
    =1, highlightbackground="grey50")
1051 canvas_led.pack(side="left", padx=(0,10))
1052 led = canvas_led.create_oval(5, 5, 25, 25, fill="#cc0000", outline="grey50",
    width=2)
1053
1054 botoao_conexao = tk.Button(frame_conectar, text="Conectar", bootstyle="primary
    -outline", width=24, command=alternar_conexao)
1055 botoao_conexao.pack()
1056
1057
1058 botoao_resetar = tk.Button(frame_botoes, text="Resetar Dados", bootstyle="
    warning", width=24, command=resetar_dados)
1059 botoao_resetar.grid(row=1, column=0, pady=(0,20))
1060
```

```
1061 botoao_salvar_img = tb.Button(frame_botoes, text="Salvar Imagem", bootstyle="
    primary", width=24, command=salvar_imagem)
1062 botoao_salvar_img.grid(row=2, column=0, pady=(0,20))
1063
1064 botoao_salvar_csv = tb.Button(frame_botoes, text="Salvar CSV", bootstyle="
    primary", width=24, command=salvar_csv)
1065 botoao_salvar_csv.grid(row=3, column=0, pady=(0,20))
1066
1067 atualizar_grafico()
1068 app.mainloop()
```

Código B.2 – Código interface Visual Studio