

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

ELIESER GABRIEL SILVA CORREA SIQUEIRA

PEDRO DE PAIVA REIS

BANCADA DIDÁTICA DE ENSAIO DE VIBRAÇÃO

São José dos Campos
2024

ELIESER GABRIEL SILVA CORREA SIQUEIRA

PEDRO DE PAIVA REIS

BANCADA DIDÁTICA DE ENSAIO DE VIBRAÇÃO

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Projetos de Estruturas Aeronáuticas.

Orientador: Dr. Bruno Peruchi Trevisan

Coorientador: Me. Fabiana Eloisa Passador

São José dos Campos
2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

SIQUEIRA, Elieser Gabriel Silva Correa.
 REIS, Pedro de Paiva.
 Bancada Didática de Ensaio de Vibração.
 São José dos Campos, 2024.
 86f.

Trabalho de Graduação – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas.
 FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal, 2024.
 Orientador: Dr. Bruno Peruchi Trevisan.
 Coorientador: Me. Fabiana Eloisa Passador.

1. Bancada Didática 1. 2. Ensaio de Vibração 2. 3. Bancada de Ensaio 3. I. Faculdade de
 Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. Divisão de Informação e
 Documentação. II. Bancada Didática de Ensaio de Vibração

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

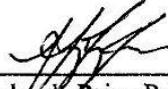
SIQUEIRA, Elieser Gabriel Silva Correa; REIS, Pedro de Paiva. **Bancada Didática de Ensaio de Vibração**. 2024. 86f. Trabalho de Graduação - FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal.

CESSÃO DE DIREITOS

NOMES DOS AUTORES: Elieser Gabriel Silva Correa Siqueira, Pedro de Paiva Reis.
 TÍTULO DO TRABALHO: Bancada Didática de Ensaio de Vibração.
 TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Graduação/2024.

É concedida à FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal permissão para reproduzir cópias deste Trabalho e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho pode ser reproduzida sem a autorização do autor.


 Elieser Gabriel Silva Correa Siqueira
 Av. Cesare Monsueto Giulio Lattes, 1350
 Distrito - Eugênio de Melo
 12247-014, São José dos Campos - São Paulo


 Pedro de Paiva Reis
 Av. Cesare Monsueto Giulio Lattes, 1350
 Distrito - Eugênio de Melo
 12247-014, São José dos Campos - São Paulo

ELIESER GABRIEL SILVA CORREA SIQUEIRA

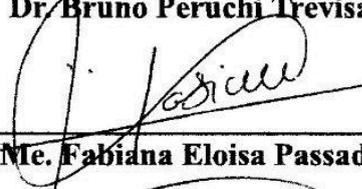
PEDRO DE PAIVA REIS

BANCADA DIDÁTICA DE ENSAIO DE VIBRAÇÃO

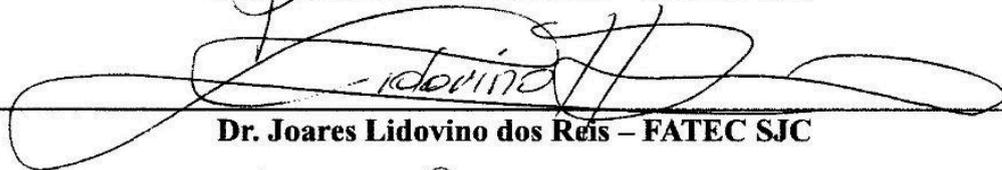
Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Projeto de Estruturas Aeronáuticas.



Dr. Bruno Peruchi Trevisan – FATEC SJC



Me. Fabiana Eloisa Passador – FATEC SJC



Dr. Joares Lidovino dos Reis – FATEC SJC



Me. Lucas Giovanetti – FATEC SJC

21,06,2024

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

À Deus pelas oportunidades apresentadas.

Ao João Nogueira e Giovanni Kotinda pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Bruno Trevisan pelo apoio e orientação no desenvolvimento do trabalho.

Aos membros do corpo docente da FATEC-SJC por influenciarem positivamente na nossa formação acadêmica.

“Se vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes.”

Isaac Newton

RESUMO

As vibrações estão presentes na maioria das atividades humanas e são exploradas em diversas aplicações de engenharia (tais como, pontes, arranha-céus, estruturas aeronáuticas, dentre outras) em busca de se obter condições seguras de operação estrutural. Para formar bons profissionais projetistas de estruturas, torna-se necessário uma abordagem de aprendizagem na fase acadêmica mais prática, que busque aprimorar a compreensão das soluções propostas em aula e de mercado. No entanto, é difícil para uma instituição ter o acesso a uma infraestrutura com laboratórios de ensaio de vibração. A proposta deste projeto de graduação tecnológico é desenvolver uma bancada didática de ensaio de vibração não amortecida baseada em uma estrutura primária, um absorvedor dinâmico de vibração acoplado, um kit de eletrônica, e um procedimento experimental, a fim de trazer exemplos tangíveis na faculdade. A avaliação dos resultados será mediante uma análise do material em termos de: 1) praticidade, no que se refere à simplicidade de utilização em aula; 2) confiabilidade, através da comparação entre os experimentos teóricos e práticos; e 3) custo de fabricação, avaliando o acesso aos materiais de construção e o processo de montagem. O projeto fornece um material suficiente para se interiorizar a tecnologia numa faculdade.

Palavras-Chave: Bancada Didática; Ensaio de Vibração; Bancada de Ensaio.

ABSTRACT

Vibrations are present in most human activities and are explored in various engineering applications (such as bridges, skyscrapers, aeronautical structures, among others) in an attempt to obtain safe structural operating conditions. To train good professional structural designers, it is necessary to have a learning approach in the more practical academic phase, which seeks to improve understanding of the solutions proposed in class and on the market. However, it is difficult for an institution to have access to an infrastructure with vibration testing laboratories. The purpose of this technological graduation project is to develop a didactic undamped vibration test bench based on a primary structure, a coupled dynamic vibration absorber, an electronics kit, and an experimental procedure, in order to bring tangible examples to college. The results will be evaluated through an analysis of the material in terms of: 1) practicality, in terms of simplicity of use in class; 2) reliability, through comparison between theoretical and practical experiments; and 3) manufacturing cost, evaluating access to construction materials and the assembly process. The project provides sufficient material to internalize the technology in a college.

Keywords: Academic Bench; Vibration Test; Test Bench.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1. Objetivo Geral | 11 |
| 1.2. Objetivos Específicos | 12 |
| 1.3. Proposta Metodológica | 12 |
| 1.4. Conteúdo do Trabalho | 13 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 2.1. Conceitos Básicos de Vibração | 15 |
| 2.2. Conceitos Básicos de Desbalanceamento Rotativo | 17 |
| 2.3. Conceitos Básicos de ADVs | 20 |
| 3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO | 26 |
| 3.1. Dimensionamento | 26 |
| 3.2. Fabricação e Montagem | 28 |
| 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 38 |
| 4.1. Introdução | 38 |
| 4.2. Experimento 1 - Elementos de Rigidez da Estrutura Primária | 40 |
| 4.3. Experimento 2 - Elementos de Inércia da Estrutura Primária | 41 |
| 4.4. Experimento 3 - Estrutura Primária sob Vibração Livre | 42 |
| 4.5. Experimento 4 - Estrutura Primária sob Vibração Forçada | 43 |
| 4.6. Experimento 5 - Sintonização de ADV | 44 |
| 4.7. Experimento 6 - Estrutura Primária sob Vibração Forçada com ADV | 45 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 46 |
| 5.1. Introdução | 46 |
| 5.2. Experimento 1 - Elementos de Rigidez da Estrutura Primária | 47 |
| 5.3. Experimento 2 - Elementos de Inércia da Estrutura Primária | 49 |
| 5.4. Experimento 3 - Estrutura Primária sob Vibração Livre | 51 |
| 5.5. Experimento 4 - Estrutura Primária sob Vibração Forçada | 53 |
| 5.6. Experimento 5 - Sintonização de ADV | 55 |
| 5.7. Experimento 6 - Estrutura Primária sob Vibração Forçada com ADV | 58 |
| 6. CONCLUSÃO | 61 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |
| APÊNDICE A – RELAÇÃO DE BENS E SERVIÇOS REQUERIDOS | 63 |
| APÊNDICE B – DETALHAMENTO DE FABRICAÇÃO | 70 |
| APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO DA INTERFACE ELETRÔNICA | 82 |

1. INTRODUÇÃO

“Qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação (...) A teoria de vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles” (RAO, 2008, p.6).

As vibrações estão associadas a transferência ou armazenamento de energia e estão presentes no nosso dia a dia. Elas podem ser observadas em várias situações comuns da nossa vida, como o simples ato de ouvir algo, onde nossos tímpanos captam vibrações no ar, ou de falar, onde nossas cordas vocais, na laringe, emitem vibrações no ar (RAO, 2008). O ser humano e o ambiente estão sujeitos a ela por fenômenos da natureza como terremotos, incidência dos ventos, marés, ou até por atividades do próprio homem, como a vibração inerente da motorização, vista em carros por exemplo.

Geralmente os efeitos da vibração são indesejáveis, podendo ser avaliados de três pontos de vista para o ser humano: de conforto, economia e segurança. Processos que envolvem ruídos vibratórios constantes impedem o convívio humano no ambiente. O ser humano é influenciado diretamente pelo local, sentindo todos os ruídos das vibrações. Desajustes e desbalanceamentos em máquinas impactam na eficiência do processo, causam desgastes, danos, além de ser uma forma de energia perdida, gerando custos desnecessários. Já em termos de segurança, pode-se observar casos de prédios e casas que pela incidência cíclica da força dos ventos, ou movimentação do solo, apresentam trincas e fissuras que passam a ser fendas e comprometem a estrutura, colocando a segurança dos residentes em risco.

Todavia, há situações em que os efeitos da vibração são desejáveis, como em sistemas bate-estacas, cubas vibratórias, respiradores mecânicos, tratamentos de ligas, entre outras. Aplicações que geralmente abordam isoladores, excitadores e absorvedores de vibração, por exemplo, são dimensionadas em termos de elemento de massa, rigidez e amortecimento que quando acoplados à estrutura mecânica são capazes de lidar com os efeitos indesejáveis. Pode-se observar tal caso no estádio de futebol Mineirão, em Belo Horizonte-MG, onde foram colocados dezenas de amortecedores (à base de TMD - *Tuned Mass Dampers* ou amortecedores de massa sintonizada) para suportar a vibração da arquibancada nos jogos (JM1-JORNAL DAS MONTANHAS, 2011).

Portanto, compreender as vibrações e atenuá-las, quando indesejadas, pode significar a segurança da estrutura, além de maior economia e conforto, seja num projeto

de alicerce de uma casa, uma ponte estaiada, balanceamento de um arranha-céu, ou até uma asa de aeronave.

É de fundamental importância que o projetista de estruturas tenha desde o início da fase acadêmica interações práticas, a fim de familiarizar os conceitos teóricos dos fenômenos físicos com situações reais. Visto que a faculdade FATEC SJC não possui um laboratório de ensaio de vibrações, o desenvolvimento de bancadas didáticas de ensaio de vibração aplicáveis em sala de aula pode atender bem a necessidade, haja visto o trabalho desenvolvido por Costa (2022) de uma bancada didática para a determinação da constante elástica da mola (Figura 1).

Figura 1 - Bancada didática para a determinação da constante elástica da mola.



Fonte: Costa (2022).

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma bancada didática de ensaio de vibração de fins acadêmicos baseado em uma estrutura primária de vibração não amortecida, um absorvedor dinâmico de vibração acoplado, e uma interface eletrônica (motor desbalanceado, placa de sensor IR-Tacômetro, placa de acionamento de potência, central de controle) para o controle de vibração incidente na estrutura primária. Também, desenvolver um procedimento experimental com uma abordagem teórica e prática da bancada sob parâmetros pré-definidos (altura, velocidade de rotação de motor, comportamento do sistema desejado, entre outros), o qual a avaliará e orientará os métodos de sua utilização. A ideia é que todo esse material sirva como ferramenta complementar na

disciplina de vibrações, e que, no fim, o estudante tenha o entendimento necessário do comportamento dos sistemas vibratórios.

1.2. Objetivos Específicos

Para a concepção deste objetivo geral foram estabelecidos os objetivos específicos:

- Realizar uma análise de necessidade acadêmica com professor;
- Propor uma solução simples e de execução viável na faculdade;
- Revisar os conceitos básicos de vibração, absorvedores dinâmico de vibração, e aplicações feitas para o ensino de vibração;
- Esboçar um protótipo em CAD e revisar com o professor de vibração;
- Relacionar os itens e recursos necessários para o desenvolvimento do material;
- Orçar, comprar e separar itens de montagem e ferramentas de fabricação;
- Realizar processo de fabricação e montagem da bancada;
- Propor um procedimento experimental que avalie e oriente os métodos de utilização da bancada;
- Avaliar os resultados, concluir a eficácia da solução proposta.

1.3. Proposta Metodológica

Para atender os objetivos deste trabalho, a metodologia de análise utilizada foi estruturada em termos de economia, praticidade, e confiabilidade. Da seguinte forma:

Economia: Para a construção da bancada, foi feita uma análise dos recursos necessários (físico, humano, financeiro) com a premissa de que quanto mais fácil o acesso aos recursos, mais economicamente viável será sua execução.

Praticidade: Em se tratando de praticidade, o método de análise feito define a fácil manuseabilidade do material em sala de aula, simplicidade de ajuste, operação, e verificação de resposta. Além da adaptação dos exercícios experimentais com a grade da disciplina de vibrações.

Confiabilidade: Já em termos de confiabilidade, diz respeito à fidelidade dos valores teóricos com os práticos nos ensaios. O comportamento do sistema deve apresentar uma

proximidade com os valores teóricos, tendo um desvio minimamente aceitável para os fins acadêmicos.

1.4. Conteúdo do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis Capítulos, cujo conteúdo é sucintamente apresentado a seguir:

No Capítulo 2 foi feita a revisão bibliográfica dos conceitos necessários para a construção da bancada didática. Há uma breve abordagem dos assuntos elementares do sistema de vibração proposto, com as principais equações para estruturas sob regime de vibração forçada tipo desbalanceamento rotativo e estruturas com absorvedor dinâmico de vibração tipo passivo.

No Capítulo 3 foi realizado um detalhamento do processo de fabricação da bancada de ensaio de vibração. Divididos em dois tópicos, o dimensionamento - o qual aborda os requisitos do projeto, o protótipo em CAD da bancada e a lista de materiais para a compra - e fabricação e montagem - onde se explana a separação dos materiais em conjuntos mecânicos, o levantamento das atividades de fabricação, os processos de fabricação envolvidos (furos, cortes, colagem) e, por fim, o processo de montagem.

No Capítulo 4 foi feito um procedimento experimental que além de avaliar a bancada, serve como orientação dos métodos de utilização da bancada em aula. O procedimento experimental dispõe de seis experimentos, os quais descrevem os assuntos de vibrações tratados, as ferramentas e as atividades necessárias para sua realização.

No Capítulo 5 foi feita uma análise dos resultados obtidos e uma breve discussão a respeito dos motivos de tais resultados. De modo geral, uma análise teórica, prática, dos desvios e a interpretação dos resultados, a fim de o estudante entender os desafios e particularidade da solução proposta, a bancada didática de ensaio de vibração.

No Capítulo 6 foi feita uma avaliação do atendimento aos requisitos esperados para a bancada didática de ensaio de vibração em termos de economia, praticidade, e confiabilidade. Evidencia-se os indícios de não cumprimento no dispositivo, esclarecendo, assim, a viabilidade de adoção da bancada nas aulas de vibração, além de explanar ideias complementares que podem ser realizadas em trabalhos futuros.

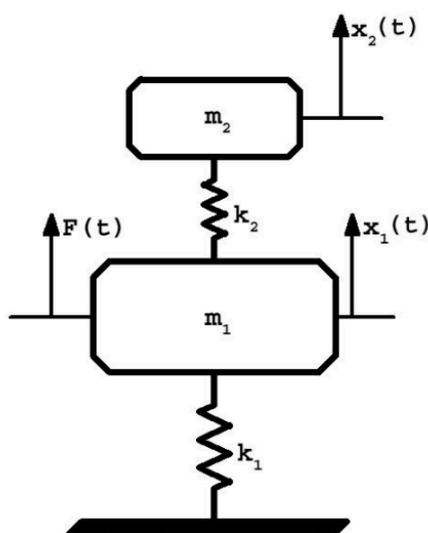
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento do trabalho, de criar um material de ensaio que sirva de ferramenta complementar nas aulas de vibrações, o modelo de estudo escolhido foi o sistema vibratório de dois graus de liberdade sem amortecimento, composto por uma estrutura primária, composta por uma massa m_1 e por uma mola k_1 , e por uma estrutura secundária, por uma massa m_2 e uma mola k_2 , conforme mostrado na Figura 2 (CUNHA, 1999 apud KOTINDA, 2008). O modelo também possui um elemento que fornece uma força de excitação externa F acoplada na estrutura primária.

Para descrever completamente o movimento de todas as partes do sistema vibratório, torna-se necessário conhecer o número de coordenadas independentes, chamadas de graus de liberdade. No modelo de estudo, utiliza-se uma análise matemática discreta considerando um grau de liberdade para cada estrutura, assim, apresenta-se um número finito de graus de liberdade (x_1, x_2), com parâmetros concentrados em um ponto (m_1, m_2), e equações diferenciais ordinárias (x, \dot{x}, \ddot{x}).

A escolha tomada foi em busca de um modelo simples e que possibilitasse amplas observações didáticas, desde elementos de um sistema vibratório, vibração livre, vibração forçada tipo desbalanceamento rotativo, e absorvedor dinâmico de vibração (ADV), o qual é a própria estrutura secundária acoplada.

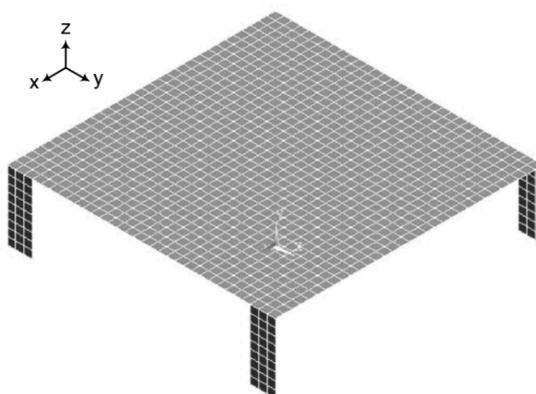
Figura 2 - Modelo de uma estrutura primária com ADV não amortecido.



Fonte: Cunha (1999 apud KOTINDA, 2008).

Para alcançar o modelo de estudo, cada estrutura foi representada como uma mesa suportada por quatro lâminas (Figura 3), operando, assim, como um sistema de um grau de liberdade (g.d.l). O deslocamento principal é considerado na direção x , pelo fato da rigidez do sistema nessa direção ser menor que na direção y (KOTINDA, 2008, p.21). Também, o elemento que fornece a força de excitação externa F foi representado por um motor desbalanceado, cujo comportamento é harmônico, o qual é suficiente para nossas análises.

Figura 3 - Sistema de um g.d.l. acoplado a quatro lâminas.



Fonte: Adaptado de Kotinda (2008).

2.1. Conceitos Básicos de Vibração

Ao analisar os sistemas vibratórios, é possível observar que basicamente podem ser constituídos por três elementos: de inércia, rigidez e dissipativo. Na representação da mesa suportada por lâminas (Figura 3) por exemplo, a massa concentrada na mesa é o elemento de inércia - detém a capacidade de armazenar energia cinética, a lâmina engastada é o elemento de elasticidade ou rigidez - detém a capacidade de armazenar energia potencial, e o próprio arrasto do ar é o elemento dissipativo - detém a capacidade de dissipar gradualmente energia. Para o nosso caso, no entanto, pode-se desconsiderar o arrasto do ar por ser muito pequeno.

As equações elementares para começar a tratar do material são referentes à rigidez k , para vigas engastadas com carga na extremidade, (Equação 1), rigidez equivalente k_{eq} , para associação em paralelo de molas, (Equação 2), e o valor da massa da mesa m , dado pela relação da densidade, (Equação 3).

$$k = (3 \cdot E \cdot I) / l^3 \quad (1)$$

$$k_{eq} = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 \quad (2)$$

$$m = \rho \cdot V \quad (3)$$

Onde k é a rigidez da lâmina, E , o módulo Young, I , o momento de inércia, l , o comprimento, ρ , a densidade ou massa específica, e V , o volume.

As equações para a análise das vibrações da mesa foram desenvolvidas pelo método de Newton, partindo da 2ª Lei de Newton (Equação 4) e da Lei de Hooke (Equação 5), chegando na forma genérica da equação do movimento para um sistema de vibração livre com um grau de liberdade (Equação 6).

$$F = m \cdot \ddot{x} \quad (4)$$

Onde F é a força, m é a massa, e \ddot{x} é a aceleração.

$$F = -k \cdot x \quad (5)$$

Onde F é a força, k é a constante elástica e x o deslocamento.

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = 0 \quad (6)$$

Após determinadas associações algébricas com equações de forma harmônica $x(t) = C \cdot e^{i\omega t}$, onde as constantes a serem determinadas são C e ω (ômega). A frequência natural de vibração (Equação 7) e suas relações com a frequência linear (Equação 8) e o período (Equação 9) são definidas.

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (7)$$

$$F = \omega_n / 2\pi \quad (8)$$

$$T = 2\pi / \omega_n \quad (9)$$

Onde ω_n é a frequência de vibração natural, k é a constante elástica, e m é a massa.

Por conseguinte, as equações do deslocamento (x), velocidade (\dot{x}), e aceleração (\ddot{x}) da estrutura em regime de vibração livre, onde nenhuma força externa age sobre o sistema, podem ser expressas conforme as Equações 10, 11, 12, respectivamente.

$$x = A \cdot \text{sen}(\omega_n t + \varphi) \quad (10)$$

$$\dot{x} = A \cdot \omega_n \cdot \text{cos}(\omega_n t + \varphi) \quad (11)$$

$$\ddot{x} = -A \cdot \omega_n^2 \cdot \text{sen}(\omega_n t + \varphi) \quad (12)$$

Onde A é a amplitude de vibração máxima e φ é o ângulo de fase.

2.2. Conceitos Básicos de Desbalanceamento Rotativo

A presença de uma massa excêntrica ou desbalanceada sobre um disco rotativo causa vibração. Se a vibração for indesejável, pode ser eliminada removendo a massa excêntrica ou adicionando uma massa numa posição tal que cancele o efeito do desbalanceamento (RAO, 2008, p.308).

Para descrever o comportamento do modelo de estudo sob regime de vibração forçada, onde ocorre uma aplicação de uma força externa, é necessário incluir uma força de excitação harmônica $F(t)$ no sistema em equilíbrio (Equação 13), isto é, sob regime de vibração livre. Logo, pode-se definir a forma genérica da equação do movimento (Equação 14), e, fazendo as devidas associações algébricas, o deslocamento (x) da estrutura em regime de vibração forçada (Equação 15).

$$F(t) = F_0 \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (13)$$

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = F_0 \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (14)$$

$$x(t) = A \cdot \text{sen}(\omega_n t + \varphi) + F_0 / (k - m \cdot \omega^2) \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (15)$$

Onde A é a amplitude de vibração, φ é o ângulo de fase, F_0 é a amplitude da força externa, ω_n e ω são as frequências de vibração natural e da força externa, respectivamente.

No modelo de estudo proposto, o tipo de vibração forçada adotado foi o desbalanceamento rotativo, visto que, quando acoplado na estrutura primária apresentará um comportamento harmônico, necessário para as análises. Além das formulações

anteriores, é possível então desenvolver o cálculo da força de excitação externa para um sistema com desbalanceamento rotativo (Equação 16), a equação do movimento (Equação 17) e a amplitude de deslocamento X (Equação 18). Adequando a solução proposta no modelo apresentado, a estrutura primária com desbalanceamento rotativo ficará conforme a Figura 4.

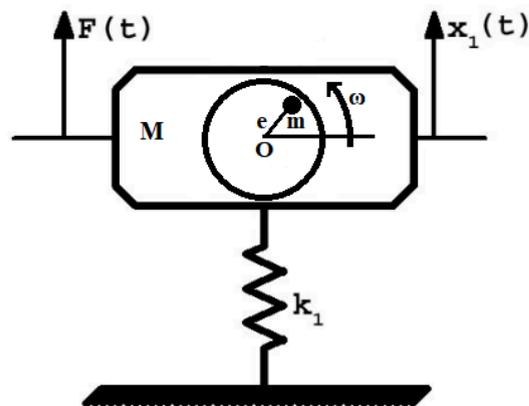
$$F_0 = m \cdot e \cdot \omega^2 \quad (16)$$

$$M \cdot \ddot{x} + k \cdot x = m \cdot e \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \quad (17)$$

$$X = (m \cdot e \cdot \omega^2) / (k - M \cdot \omega^2) \quad (18)$$

Onde M é a massa global, m , a massa excêntrica, e , a distância do eixo, e ω é a frequência da excitação externa.

Figura 4 - Modelo de uma estrutura primária com desbalanceamento rotativo.



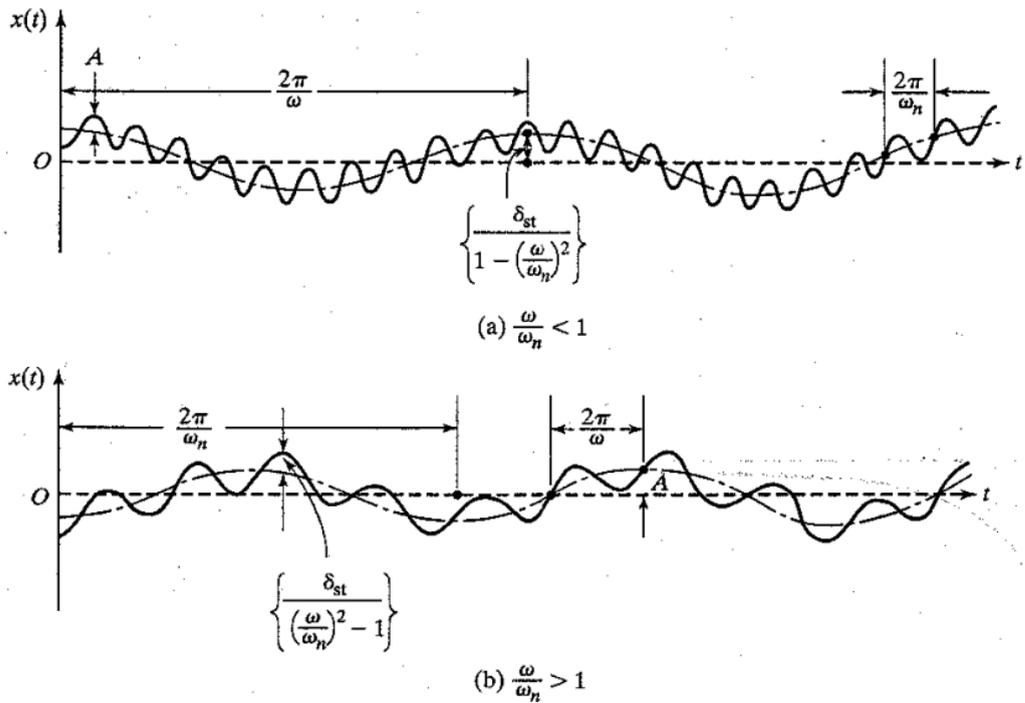
Fonte: Autores (2024).

Outra forma complementar, na vibração forçada, de se entender o comportamento do sistema é pelo chamado fator de magnificação β (Equação 19), que descreve se o sistema vibratório está em fase - a relação de frequências externa e natural é menor que 1 ($\omega/\omega_n < 1$, Figura 5 (a)), fora de fase - a relação de frequências externa e natural é maior que 1 ($\omega/\omega_n > 1$, Figura 5 (b)) ou em ressonância - a relação de frequências externa e natural é igual a 1 ($\omega/\omega_n = 1$, Figura 6). É de grande importância este fator, pois nos diz o que esperar da amplitude da vibração global da estrutura.

$$\beta = 1/(1 - r^2) \quad (19)$$

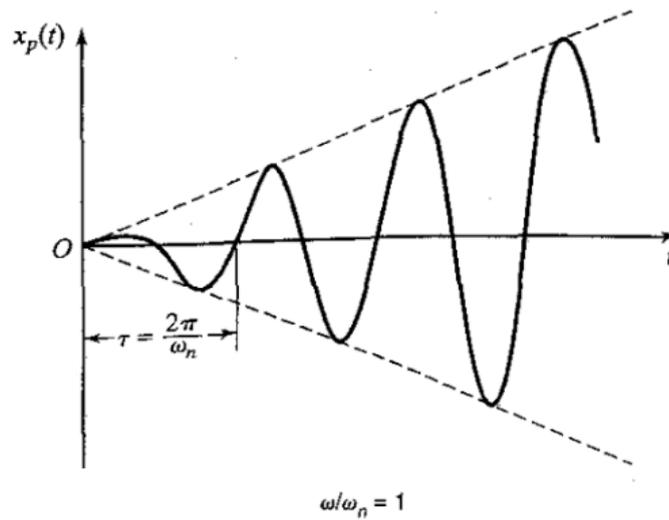
Onde r é a razão entre as frequências de vibração externa e natural (ω/ω_n).

Figura 5 - Resposta do sistema em fase (a) e fora de fase (b).



Fonte: Rao (2008).

Figura 6 - Resposta do sistema em ressonância.



Fonte: Rao (2008)

2.3. Conceitos Básicos de ADVs

Absorvedores dinâmicos de vibrações (ADV) são sistemas constituídos por elementos de massa, rigidez e amortecimento (estrutura secundária) que acoplados em uma estrutura mecânica (estrutura primária) são capazes de atenuar as vibrações desta em uma banda de frequência. Criam uma força de intensidade igual à força de excitação, porém em fase oposta. Quando os parâmetros do ADV são escolhidos para uma excitação externa específica, diz que o ADV está sintonizado (KOTINDA, 2008, p.1).

Ao analisar os sistemas vibratórios com ADVs é possível observar que basicamente são classificados em três tipos, sendo eles:

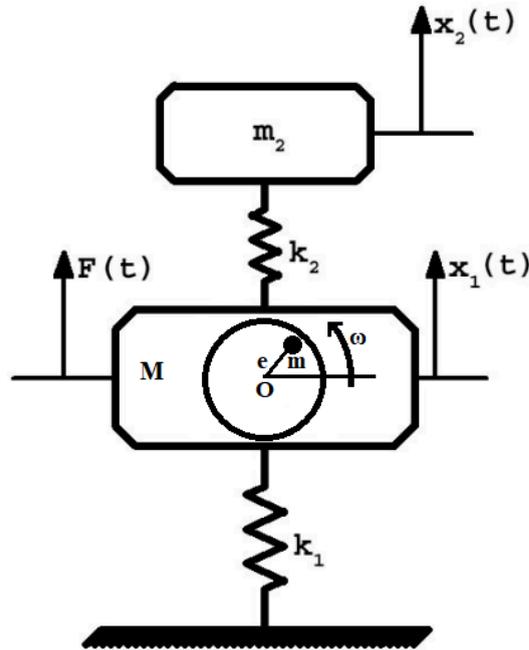
Passivo: Os ADVs passivos sintonizam sua frequência natural à frequência de excitação harmônica fixa. Embora não requeiram energia e não causem instabilidade ao sistema, sua eficiência é reduzida quando a frequência de excitação é variada (MARQUES, 2000, p.1).

Adaptativo: “Os ADVs adaptativos são aqueles cujos parâmetros físicos de massa, rigidez e amortecimento podem ser ajustados, conferindo aos dispositivos a capacidade de sintonização em uma gama maior de frequências.” (MARQUES, 2000, p.2).

Ativo: “ADVs ativos dispõem de um elemento ativo (atuador) colocado paralelamente aos elementos passivos, sendo a força exercida pelo atuador calculada através de uma estratégia de controle previamente estabelecida.” (MARQUES, 2000, p.2).

No caso deste trabalho, na representação da mesa suportada por lâminas, acoplando uma segunda mesa no sistema, com o deslocamento principal na mesma direção da primeira (Figura 7), o dispositivo trabalhará como um sistema vibratório com um ADV tipo passivo. Adotando a notação $M = m_1$, a equação do movimento, que descreve o comportamento do modelo de estudo, pode ser expressa conforme a Equação 20, para o ponto de massa m_1 , e Equação 21, para o ponto de massa m_2 .

Figura 7 - Modelo de uma estrutura primária com desbalanceamento rotativo e ADV.



Fonte: Autores (2024).

$$m_1 \cdot \ddot{X}_1 + (k_1 + k_2) \cdot X_1 - (k_2 \cdot X_2) = F_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (20)$$

$$m_2 \cdot \ddot{X}_2 + k_2 \cdot (X_2 - X_1) = 0 \quad (21)$$

Onde F_0 é a força de excitação externa, X_j , \ddot{X}_j , k_j são a amplitude de vibração, aceleração e rigidez da estrutura primária ($j = 1$) e estrutura secundária ($j = 2$).

Supondo uma solução harmônica (Equação 22) para as Equações 20 e 21.

$$x(t) = X_j \cdot \cos(\omega t) \quad (22)$$

Onde $j = 1, 2$.

Após algumas associações algébricas das equações, é possível obter as seguintes expressões das estruturas primária (Equação 23) e secundária (Equação 24):

$$[(-m_1 \cdot \omega^2) + k_1 + k_2] \cdot X_1 - (k_2 \cdot X_2) = F_0 \quad (23)$$

$$[(-m_2 \cdot \omega^2) + k_2] \cdot X_2 - (k_2 \cdot X_1) = 0 \quad (24)$$

Onde ω é a frequência de excitação externa.

Então, pode-se observar as amplitudes em regime permanente das estruturas, X_1 para a estrutura primária (Equação 25) e X_2 para a estrutura secundária (Equação 26).

$$X_1 = \frac{F_0(k_2 - m_2\omega^2)}{(k_1 + k_2 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - (k_2)^2} \quad (25)$$

$$X_2 = \frac{F_0(k_2)}{(k_1 + k_2 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - (k_2)^2} \quad (26)$$

Para que a amplitude de vibração da estrutura primária seja nula ($X_1 = 0$), pela Equação 25, necessariamente o termo do numerador que acompanha $F_0(k_2 - m_2\omega^2)$ deve ser 0. Portanto, define-se a equação da frequência de vibração global do sistema (Equação 27) e, pela Equação 23, a força de excitação do absorvedor gerada com intensidade igual à força de excitação F_0 , porém em oposição de fase (Equação 28).

$$\omega = \sqrt{(k_2/m_2)} \quad (27)$$

$$F_0 = -k_2 \cdot X_2 \quad (28)$$

Adotando a notação ω_1 para a frequência natural de vibração da estrutura primária (Equação 29), e ω_2 para a estrutura secundária (Equação 30).

$$\omega_1 = \sqrt{(k_1/m_1)} \quad (29)$$

$$\omega_2 = \sqrt{(k_2/m_2)} \quad (30)$$

As Equações 25 e 26 podem ser reescritas como nas Equações 31 e 32.

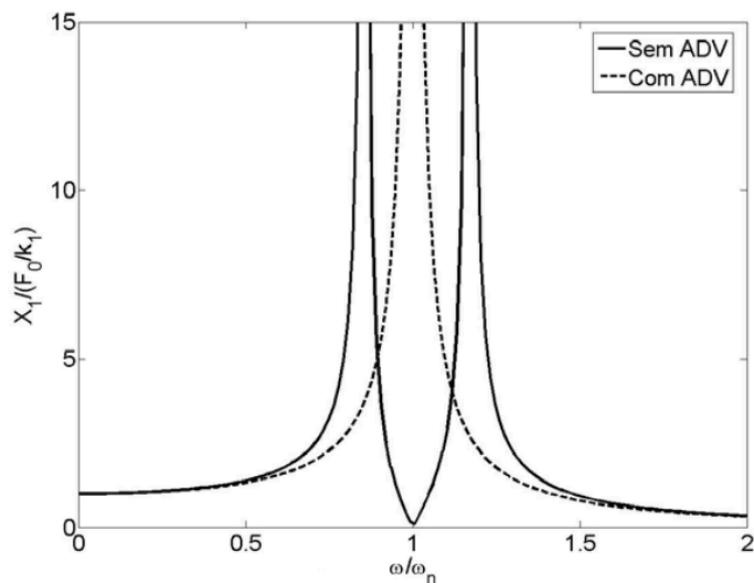
$$\frac{X_1}{F_0 \cdot k_1^{-1}} = \frac{1 - (\omega/\omega_2)^2}{[1 + (k_2/k_1) - (\omega/\omega_1)^2] \cdot [1 - (\omega/\omega_2)^2] - (k_2/k_1)} \quad (31)$$

$$\frac{X_2}{F_0 \cdot k_1^{-1}} = \frac{1}{[1+(k_2/k_1)-(\omega/\omega_1)^2] \cdot [1-(\omega/\omega_2)^2] - (k_2/k_1)} \quad (32)$$

Pela Equação 31, é possível comprovar que “a amplitude da estrutura primária é nula quando o numerador $(1 - (\omega/\omega_2)^2)$ é igual a zero, o que ocorre quando a frequência ω da força de excitação é a mesma que a frequência natural do absorvedor, ω_2 ” (KOTINDA, 2008, p.9).

Apesar de ocorrer a eliminação da vibração na frequência sintonizada, o sistema composto apresenta duas novas frequências de ressonância adjacentes, vistas na função de resposta em frequência (FRF) típica de um sistema de dois graus de liberdade (Figura 8). “Na prática, a frequência de operação ω deve ser mantida longe das duas frequências.” (RAO, 2008, p.308).

Figura 8 - FRF da massa primária m_1 , $m_2 / m_1 = 0,1$.



Fonte: Adaptado de Kotinda (2008).

A adição do absorvedor faz sentido quando a estrutura primária opera na ressonância ou próximo dela. Portanto, projeta-se a frequência natural do ADV de modo a coincidir com a da estrutura primária $\omega_2 = \omega_1$ (KOTINDA, 2008, p.10).

Adotando as notações, g para a relação de frequências (Equação 33), u para a relação de massas (Equação 34) e ω_1^2 para a frequência natural da estrutura primária e secundária (Equação 35).

$$g = \omega/\omega_1 \quad (33)$$

$$u = m_2/m_1 \quad (34)$$

$$\omega_1^2 = k_1/m_1 = k_2/m_2 \quad (35)$$

Pode-se escrever as expressões das FRFs da estrutura primária e do ADV em termos de parâmetros adimensionais, a partir das Equações 31 e 32 (Equações 36 e 37).

$$\frac{X_1}{F_0 \cdot k_1^{-1}} = \frac{(1-g^2)}{(1-g^2) \cdot (1-g^2+u) - u} \quad (36)$$

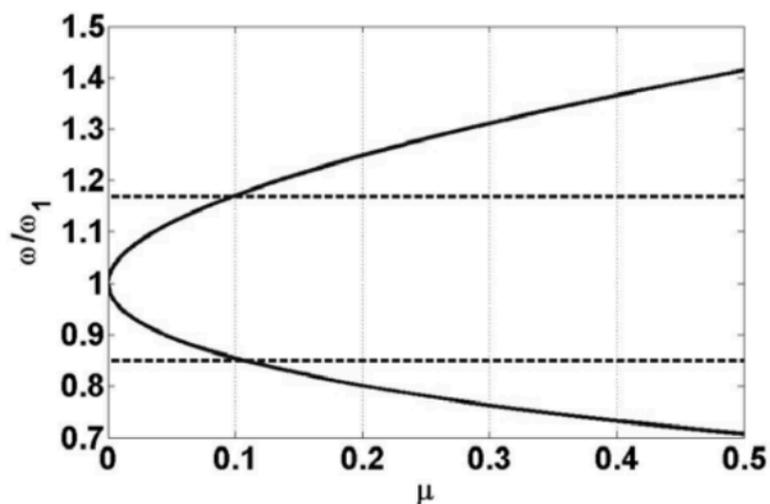
$$\frac{X_2}{F_0 \cdot k_1^{-1}} = \frac{1}{(1-g^2) \cdot (1-g^2+u) - u} \quad (37)$$

“Nota-se que seus denominadores são iguais. Quando se efetua a multiplicação dos termos que aparecem no denominador, vê-se que este apresenta um termo proporcional a g^4 , um termo proporcional a g^2 e um termo independente. Quando igualado a zero, o denominador é uma função quadrática em g^2 que tem, necessariamente, duas raízes. Assim, para dois valores da frequência de excitação ω , ambos os denominadores das equações são iguais a zero e, conseqüentemente, X_1 e X_2 tornam-se infinitamente grandes. Essas são as duas frequências naturais do sistema acoplado” (KOTINDA, 2008, p.11), vistas na Equação 38.

$$g^2 = 1 + \frac{u}{2} \pm \sqrt{u + \frac{u^2}{4}} \quad (38)$$

“Desta forma é possível, antes mesmo do acoplamento do ADV à estrutura primária, saber quais serão as frequências naturais do sistema de dois g.d.l. resultante e assim concluir acerca do comportamento dinâmico do sistema acoplado.” (KOTINDA, 2008, p.11). A equação 38 é representada através da Figura 9.

Figura 9 - Variação das frequências naturais do sistema em função de u .



Fonte: Adaptado de Kotinda (2008).

“Como exemplo, nota-se que a utilização de um ADV de massa igual a 1/10 da massa do sistema primário provoca o aparecimento de duas frequências naturais do sistema acoplado em 1,17 e 0,85 vezes a frequência natural da estrutura primária, quando considerada isoladamente.” (KOTINDA, 2008, p.12). No modelo proposto, a relação de massa (u) projetada foi igual a 1/2. Portanto, as frequências naturais da estrutura foram 1,41 e 0,71 vezes a frequência natural da estrutura primária.

3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

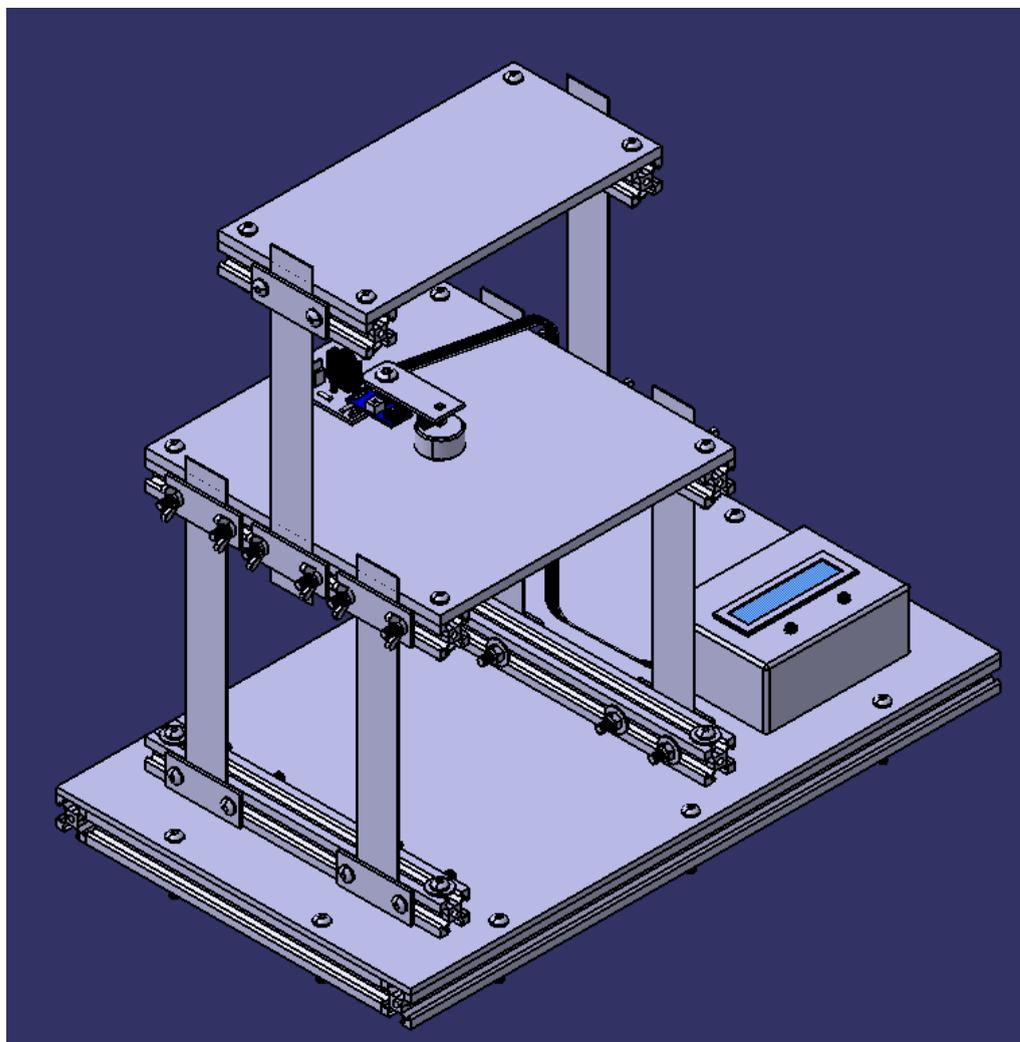
3.1. Dimensionamento

A bancada didática de ensaio de vibração teve seu dimensionamento pensado não só para se adequar a uma sala de aula, como ferramenta complementar, mas também para se fabricar numa oficina de faculdade, com a infraestrutura disponível relativamente simples. Ao analisar como referência projetos semelhantes, feitos por Costa(2022) e Kotinda(2008), em termos de mobilidade, composição de materiais e processos de fabricação, foi feito um levantamento dos seguintes requisitos a serem atendidos:

- A dimensão da bancada deve ser de no máximo 300x600x500mm em largura, comprimento e altura respectivamente. Tamanho suficiente para ser carregada.
- O peso da bancada deve ser de no máximo 5kg, com materiais utilizados de preferência em alumínio e aço inox, visando a resistência mecânica e leveza.
- A composição da bancada deve ser com elementos de união móveis, como porcas e parafusos, e retalhos de chapa fina, garantindo a fácil remoção e montagem (troca).
- A bancada deve ser composta por conjuntos mecânicos base, estrutura primária, estrutura secundária e interface eletrônica, de modo a facilitar sua construção e manutenção.
- Os processos de fabricação envolvidos devem ser apenas cortes, furos, conformação mecânica (dobra), colagem e desbaste, uma vez que exigem infraestrutura simples.
- A execução da fabricação deve ser feita por um técnico, ou estudante de mecânica, com experiência mínima com perfis, chapas de alumínio e de aço.
- A execução da fabricação deve ser feita em oficina mecânica com os ferramentais corretos, como morsa, serra de mão, furadeira de bancada, dobradeira, resina de cura rápida, lima e outros ferramentais básicos (paquímetro, alicate universal, de bico, chave sextavada, chave fixa, etc).

Em vista de atender os requisitos apresentados, o protótipo em CAD (Desenho Auxiliado por Computador) inicialmente foi concebido conforme a Figura 10.

Figura 10 - Protótipo CAD da bancada didática de ensaio de vibração.



Fonte: Autores (2024).

Adiante, foi feita uma adequação da lista de material do protótipo CAD com a disponibilidade de materiais comerciais. Os principais materiais adotados para a construção da bancada foram perfis estruturais, chapas cortadas de alumínio, régua de aço inox, porcas e parafusos de latão. Na medida do possível, na compra dos materiais, foi solicitado ao fornecedor serviços de fabricação, como furos e roscas nos eixos dos perfis, como podem ser vistos no Apêndice A - Relação de Bens e Serviços Requeridos. A lista de material ficou disposta conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Lista de material da bancada.

| Lista de Material da Bancada | | | | |
|-------------------------------------|---|--------------|------------|-------------------|
| Item | Descrição | Valor | Qnt | Observação |
| Estrutura Base | | | | |
| 1 | Perfil estrutural em alumínio 20x20mm V-Slot de canal 6mm | 500 | 2 | |
| 2 | Perfil estrutural em alumínio 20x20mm V-Slot de canal 6mm | 200 | 4 | |
| 3 | Chapa de alumínio lisa 4mm - 30x40cm | - | 1 | |
| 4 | Parafuso allen de cabeça abaulada rosca M5 de 30mm | - | 18 | Pacote 50un |
| 5 | Porca auto travante parlock rosca M5 | - | 14 | Pacote 50un |
| Estrutura Primária | | | | |
| 6 | Perfil estrutural em alumínio 20x20mm V-Slot de canal 6mm | 200 | 2 | |
| 7 | Chapa de alumínio lisa 6,35mm - 20x20cm | - | 1 | |
| 8 | Régua de aço inox 1mm - 3x20cm | - | 4 | Régua 1m |
| 9 | Retalho chapa de alumínio lisa 2mm - 2x5cm | - | 8 | Fabricado 12un |
| 10 | Parafuso allen de cabeça abaulada rosca M5 de 30mm | - | 20 | Pacote 50un |
| 11 | Porca auto travante parlock rosca M5 | - | 20 | Pacote 50un |
| Estrutura Secundária | | | | |
| 12 | Perfil estrutural em alumínio 20x20mm V-Slot de canal 6mm | 200 | 2 | |
| 13 | Chapa de alumínio lisa 6,35mm - 10x20cm | - | 1 | |
| 14 | Régua de aço inox 1mm - 3x20cm | - | 2 | Régua 60cm |
| 15 | Retalho chapa de alumínio lisa 2mm - 2x5cm | - | 4 | Fabricado 12un |
| 16 | Parafuso allen de cabeça abaulada rosca M5 de 30mm | - | 12 | Pacote 50un |
| 17 | Porca auto travante parlock rosca M5 | - | 12 | Pacote 50un |
| Interface Eletrônica | | | | |
| 18 | Motor desbalanceado 6V 800mA | - | 1 | |
| 19 | Placa de acionamento de potência | - | 1 | |
| 20 | Placa de sensor IR - Tacômetro | - | 1 | |
| 21 | Central de controle | - | 1 | |
| 22 | Fonte de alimentação 12V 1A | - | 1 | |

Fonte: Autores (2024).

3.2. Fabricação e Montagem

Nessa etapa, houve a priori uma separação dos materiais, conforme os conjuntos mecânicos pertencentes (estrutura base, estrutura primária, estrutura secundária e interface eletrônica), e um levantamento das atividades necessárias e dos processos de fabricação envolvidos, de modo a esclarecer a fabricação e montagem da bancada (Tabelas 2 a 5).

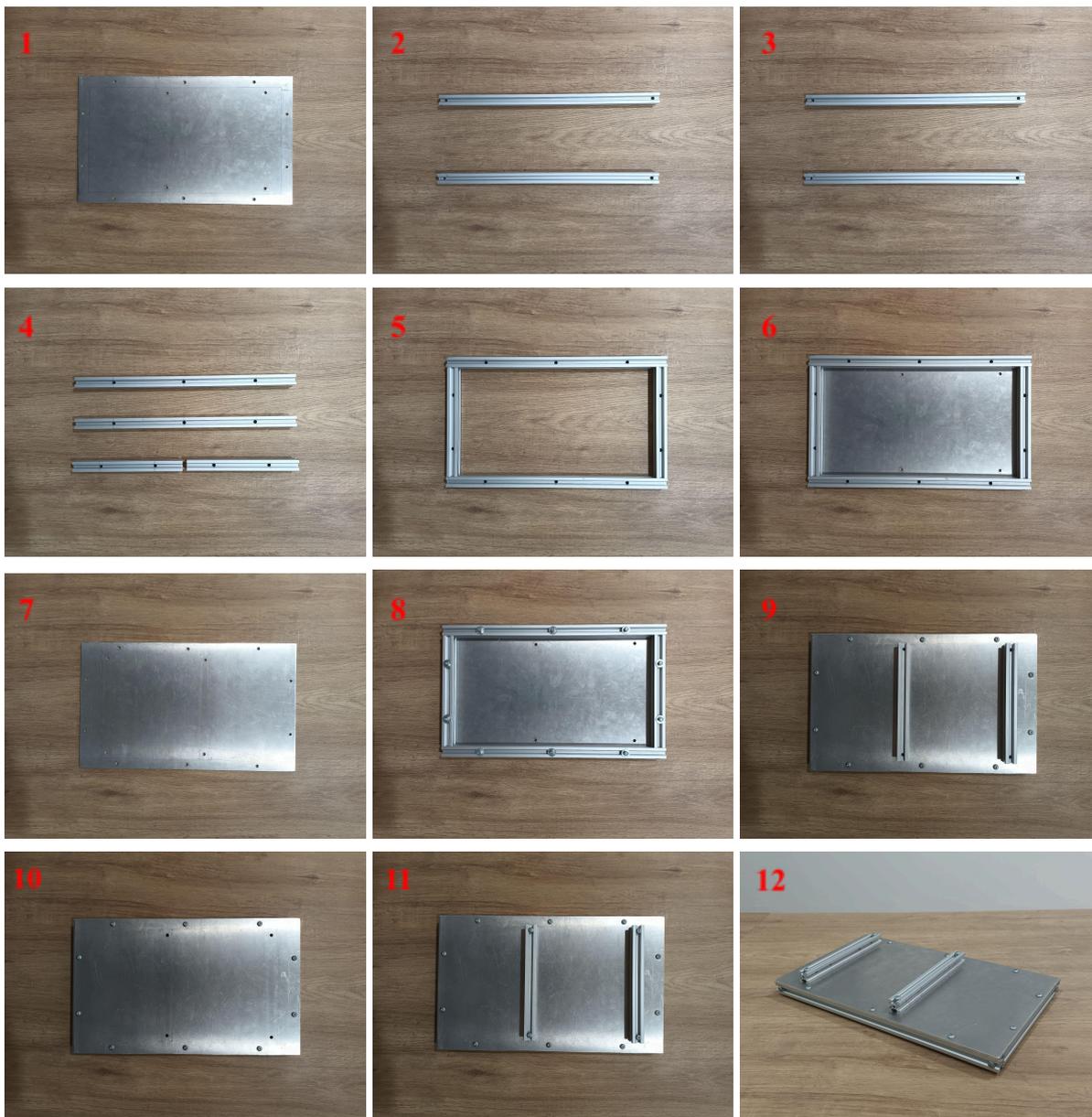
Também, houve a elaboração de desenhos detalhados das peças da bancada para consulta no Apêndice B - Detalhamento de Peças e Acessórios.

A estrutura base consiste na parte inferior da bancada, onde contém todo o suporte de engaste da estrutura primária e um espaço de alocação para a central de controle da interface eletrônica. Em relação aos demais conjuntos, ela detém a maior massa, devido ao objetivo de ser o isolamento do sistema vibrante, ou seja, da estrutura primária e secundária, pelo fenômeno da inércia. As atividades de fabricação da estrutura primária foram desenvolvidas conforme a Figura 11.

Tabela 2 - Relação de processo de fabricação da estrutura base.

| Relação de Processo de Fabricação - Estrutura Base | | | |
|--|---|-------------|-------------|
| Atividade | Descrição | Processo | Obs |
| 1 | Adequação de medidas de largura de chapa (20x40cm) | Corte | Apêndice B1 |
| 2 | Adequação de medidas de comprimento perfis (400mm) | Corte | |
| 3 | Adequação de montagem perfis - Furos passagem de chave allen | Furo | |
| 4 | Adequação de montagem perfis - Furos de fixação chapa e frame | Furo | |
| 5 | Montagem de frame de perfis (20x40cm) | Montagem | |
| 6 | Adequação de montagem perfis - Ajuste de posição de fixação | Alinhamento | |
| 7 | Adequação de montagem chapa - Furos de fixação chapa e frame | Furo | |
| 8 | Montagem de chapa e frame | Montagem | |
| 9 | Adequação de montagem perfis - Ajuste de posição de fixação | Alinhamento | |
| 10 | Adequação de montagem chapa - Furos de fixação perfil e chapa | Furo | |
| 11 | Montagem de perfis e chapa | Montagem | |
| 12 | Montagem de estrutura base | Montagem | |

Fonte: Autores (2024).

Figura 11 - Atividades de fabricação da estrutura base.

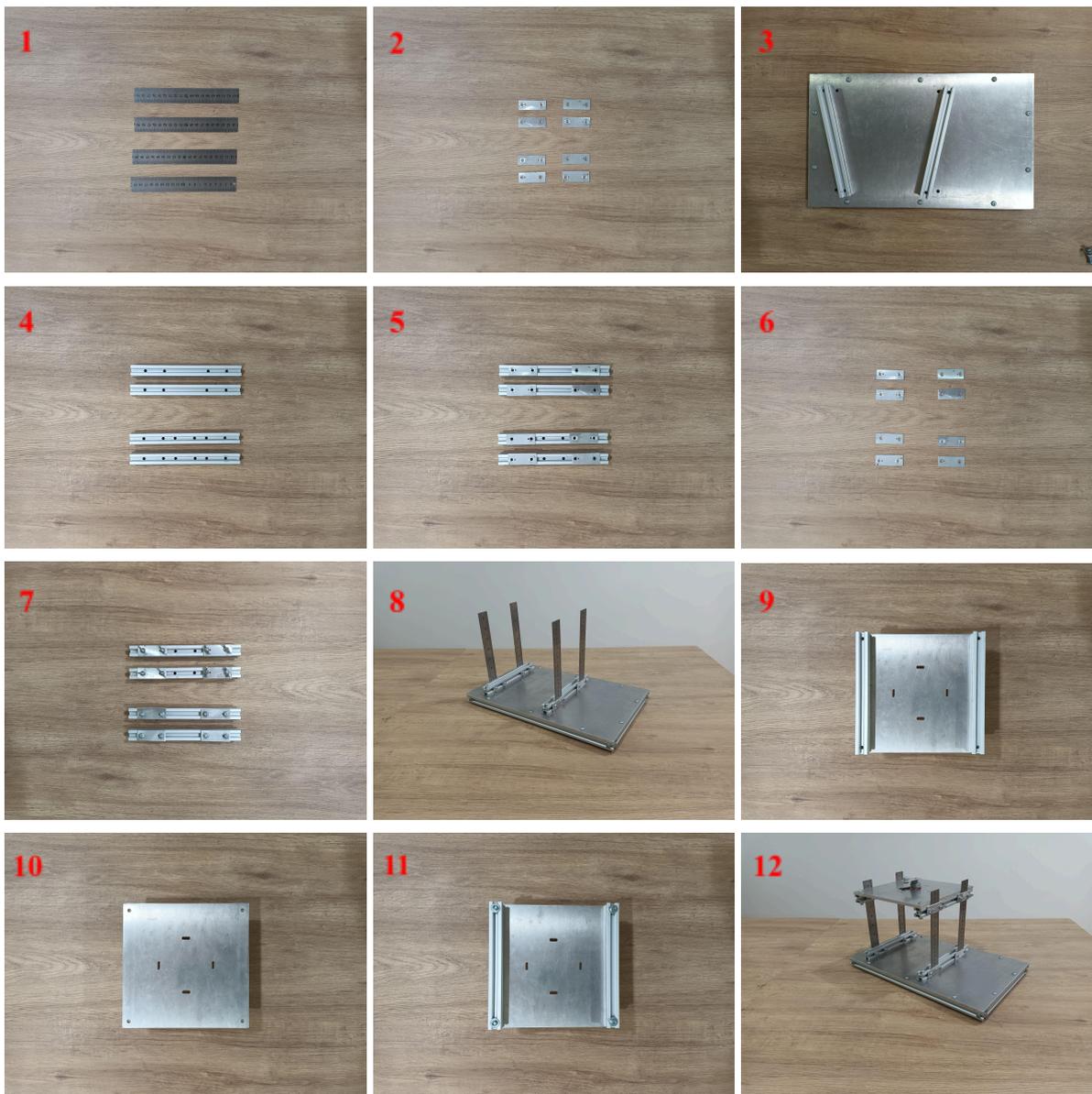
Fonte: Autores (2024).

A estrutura primária é a parte intermediária da bancada, fixada entre a estrutura base e a secundária. Grosseiramente, é a mesa suportada por quatro lâminas sujeita à vibração, nela conterà o suporte de fixação da estrutura secundária e um espaço de alocação do motor desbalanceado, da placa de sensor IR - Tacômetro e a placa de acionamento de potência. Pode-se entendê-la como o conjunto principal da bancada, pois todas as análises de estudo são sobre as excitações e respostas dela. As atividades de fabricação da estrutura primária foram desenvolvidas conforme a Figura 12.

Tabela 3 - Relação de processo de fabricação da estrutura primária.

| Relação de Processo de Fabricação - Estrutura Primária | | | |
|--|--|-------------|-------------|
| Atividade | Descrição | Processo | Obs |
| 1 | Adequação de medidas lâminas - Comprimento (200mm) | Corte | Apêndice B2 |
| 2 | Adequação de medidas retalhos - Comprimento e largura (2x5cm) | Corte | |
| 3 | Desmontagem de perfis da estrutura base | Montagem | |
| 4 | Adequação de montagem perfis - Furos de fixação perfil e retalho | Furo | |
| 5 | Adequação de montagem retalhos - Ajuste de posição de fixação | Alinhamento | |
| 6 | Adequação de montagem retalhos - Furos de fixação perfil e retalho | Furo | |
| 7 | Montagem de perfis e retalhos | Montagem | |
| 8 | Montagem de lâminas e perfis da estrutura base | Montagem | |
| 9 | Adequação de montagem perfis - Ajuste de posição de fixação | Alinhamento | |
| 10 | Adequação de montagem chapa - Furos de fixação perfil e chapa | Furo | |
| 11 | Montagem de perfil da estrutura primária e chapa | Montagem | |
| 12 | Montagem de estrutura primária acoplada na estrutura base | Montagem | |

Fonte: Autores (2024).

Figura 12 - Atividades de fabricação da estrutura primária.

Fonte: Autores (2024).

A estrutura secundária, ou o absorvedor dinâmico de vibração (ADV), é a parte superior da bancada, cuja fixação se dá na estrutura primária. É a mesa suportada por duas lâminas sujeita à vibração. Ela apresenta uma proporcionalidade com a estrutura primária, uma relação de massa (u) e medidas dimensionais próximo de 1:2, como descrito na revisão literária, a relação adotada define as frequências naturais da estrutura. As atividades de fabricação da estrutura secundária foram desenvolvidas conforme a Figura 13.

Tabela 4 - Relação de processo de fabricação estrutura secundária.

| Relação de Processo de Fabricação - Estrutura Secundária | | | |
|--|--|-------------|-------------|
| Atividade | Descrição | Processo | Obs |
| 1 | Adequação de medidas lâminas - Comprimento (200mm) | Corte | Apêndice B3 |
| 2 | Adequação de medidas retalhos - Comprimento e largura (2x5cm) | Corte | |
| 3 | Desmontagem de perfis da estrutura primária | Montagem | |
| 4 | Adequação de montagem perfis - Furos de fixação perfil e retalho | Furo | |
| 5 | Adequação de montagem retalhos - Ajuste de posição de fixação | Alinhamento | |
| 6 | Adequação de montagem retalhos - Furos de fixação perfil e retalho | Furo | |
| 7 | Montagem de perfis e retalhos | Montagem | |
| 8 | Montagem de lâminas e perfis da estrutura primária | Montagem | |
| 9 | Adequação de montagem perfis - Ajuste de posição de fixação | Alinhamento | |
| 10 | Adequação de montagem chapa - Furos de fixação perfil e chapa | Furo | |
| 11 | Montagem de perfil da estrutura secundária e chapa | Montagem | |
| 12 | Montagem da estrutura secundária acoplada na estrutura primária | Montagem | |

Fonte: Autores (2024).

Figura 13 - Atividades de fabricação da estrutura secundária.



Fonte: Autores (2024).

A interface eletrônica é composta por um motor desbalanceado, uma placa de acionamento de potência, uma placa de sensor IR-Tacômetro (alocados na estrutura primária), uma central de controle e uma fonte de alimentação (alocados na estrutura base). No processo de alocação dos dispositivos eletrônicos, em busca de simplicidade de acoplamento, foi priorizada a utilização de velcros colados diretamente na superfície tanto das mesas de alumínio, quanto dos materiais; no entanto, para o motor obter maior adesão na mesa, foi utilizada uma super cola (resina líquida).

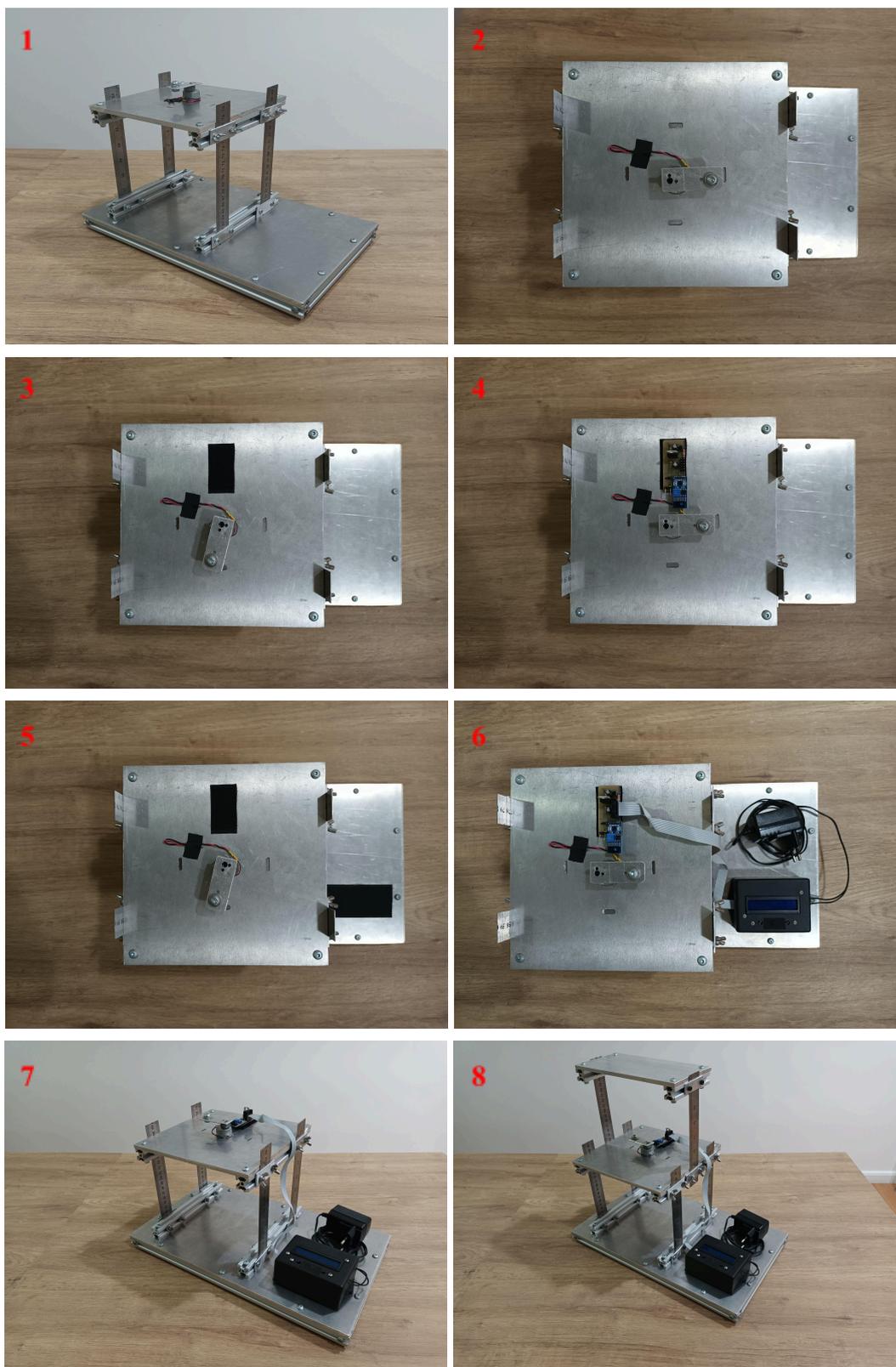
O dispositivo de interface homem-máquina (IHM), ou central de controle, dispõe de um mostrador lcd 16x2 (coluna x linha) que demonstra a potência do motor (0 a 100 %) e a rotação por minuto (rpm) do eixo. O esquema eletrônico e o código de programação da interface eletrônica estão no Apêndice C - Esquemático da Interface eletrônica. As atividades de fabricação da interface eletrônica foram desenvolvidas conforme a Figura 14.

Tabela 5 - Relação de processo de fabricação da interface eletrônica.

| Relação de Processo de Fabricação - Interface Eletrônica | | | |
|--|--|----------|-------------|
| Atividade | Descrição | Processo | Obs |
| 1 | Montagem de conjunto estrutura base e primária | Montagem | Apêndice B4 |
| 2 | Acoplamento de motor desbalanceado na estrutura primária com super cola | Colagem | |
| 3 | Acoplamento de velcro na estrutura primária com super cola | Colagem | |
| 4 | Acoplamento de placa de acionamento de potência e placa de sensor tacômetro na estrutura primária com velcro | Colagem | |
| 5 | Acoplamento de velcro na estrutura base com super cola | Colagem | |
| 6 | Acoplamento de central de controle na estrutura base com velcro | Colagem | |
| 7 | Montagem de interface eletrônica no conjunto | Montagem | |
| 8 | Montagem da bancada - União dos quatro conjuntos | Montagem | |

Fonte: Autores (2024).

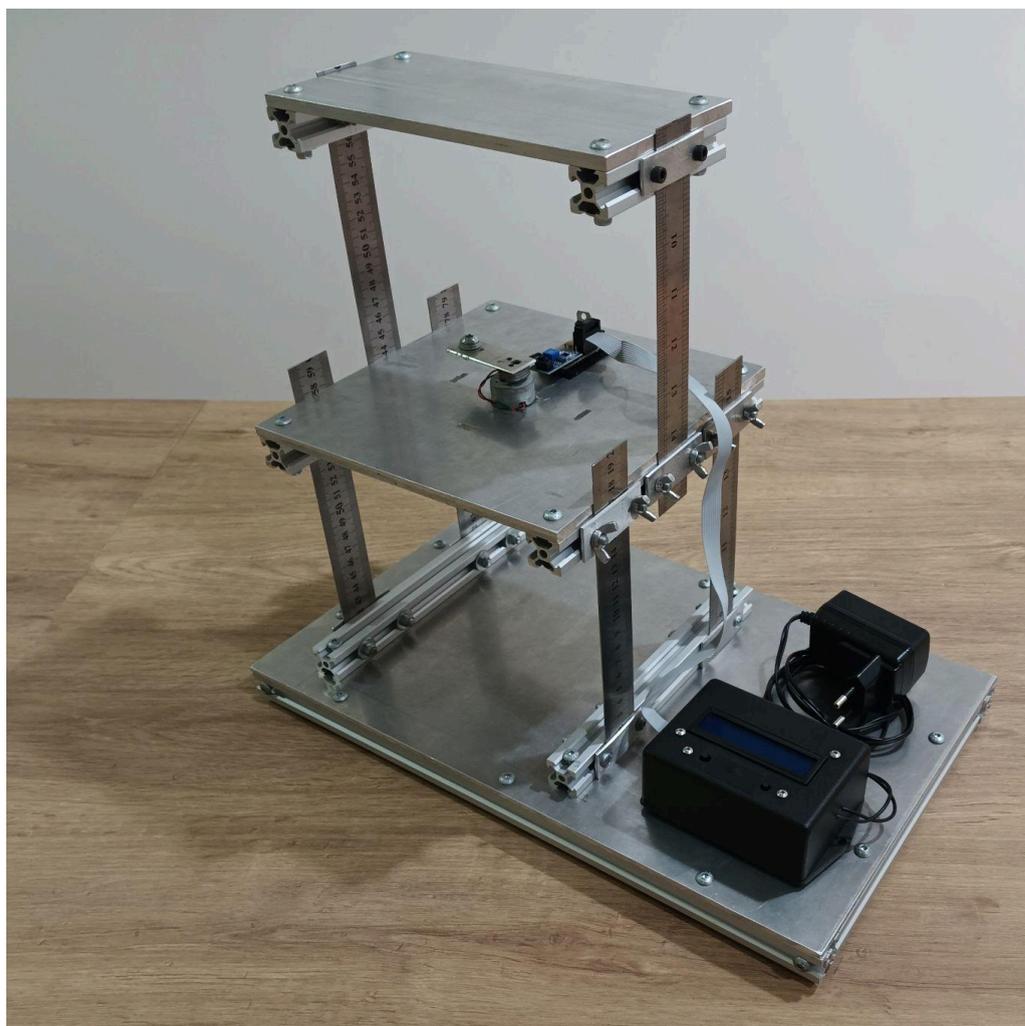
Figura 14 - Atividades de fabricação da interface eletrônica.



Fonte: Autores (2024).

De modo geral, devido a adoção dos elementos de união móveis e a subdivisão da bancada em conjuntos, é possível entendê-la como um dispositivo totalmente modular (intercambiável). Segue a bancada didática de ensaio de vibração na Figura 15.

Figura 15 - Bancada didática de ensaio de vibração.



Fonte: Autores (2024).

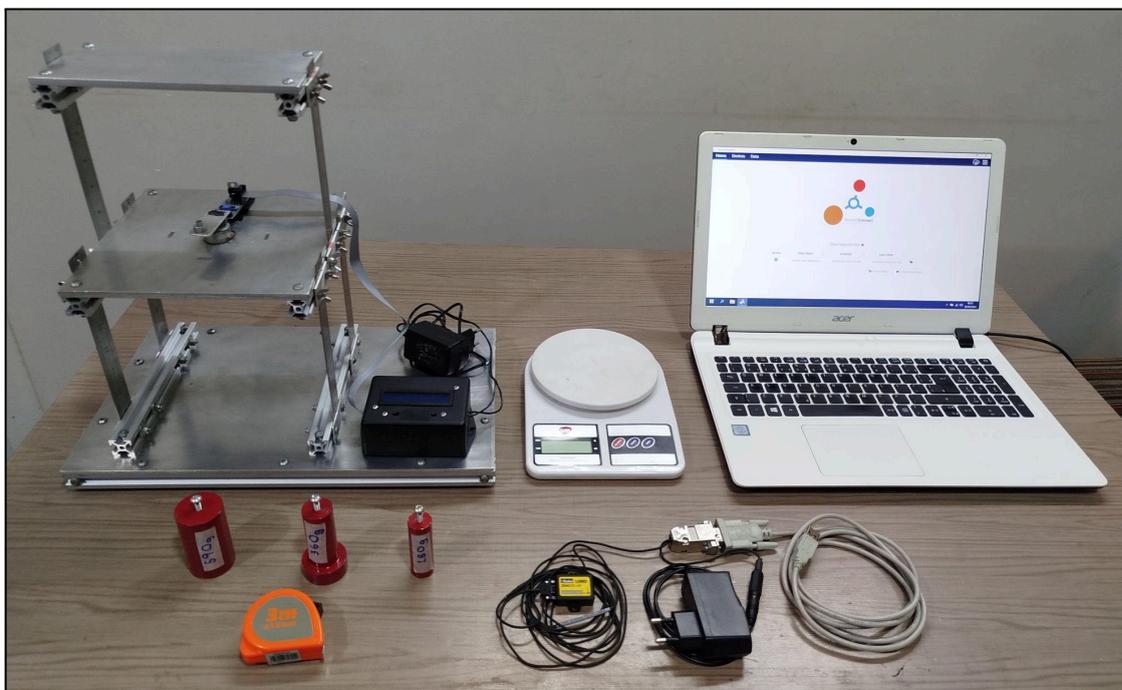
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Introdução

Para avaliar a bancada didática de ensaio de vibração e também orientar os métodos de sua utilização, foi elaborado um procedimento experimental, baseado numa resolução de problema assistida, dividido em seis abordagens da bancada (elementos de rigidez, de inércia e frequência de vibração natural da estrutura primária, frequência de vibração forçada, sintonização do ADV, análise da estrutura primária sob vibração forçada com ADV). O conteúdo de vibrações foi trabalhado conforme a particularidade de cada abordagem, trazendo uma associação prática, além da análise teórica.

Na avaliação da bancada foi necessário adotar ferramentas auxiliares que possibilitassem a aferição fidedigna dos ensaios. Portanto, adotou-se uma trena de mão, uma balança digital, três tarugos de metal com pesos diferentes, uma unidade de medição inercial (IMU) e um *laptop* (Figura 16). O fabricante da IMU escolhida dispõe de uma plataforma utilitária de aquisição de dados para configurar e coordenar o dispositivo (*software* SensorConnect), nela foi possível exibir os gráficos de amostra FFT - aceleração (g) x frequência (Hz), os quais foram essenciais para a comprovação comportamental do sistema.

Figura 16 - Ferramentas auxiliares para a aferição da bancada.



Fonte: Autores (2024).

A proposta de situação problema para o desenvolvimento do procedimento experimental foi:

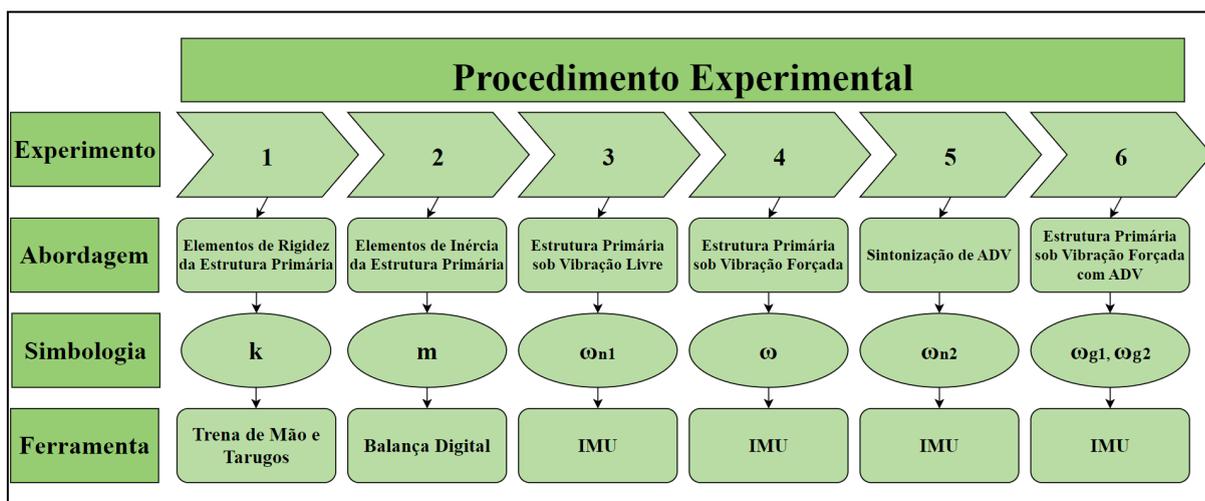
Situação problema: “A estrutura primária sofre fortes vibrações, próximo à ressonância, ao ligar seu motor levemente desbalanceado nas suas operações. Modelando o sistema como não-amortecido, com um grau de liberdade, dimensione os parâmetros do ADV (estrutura secundária) necessários para a redução da amplitude da vibração.”

Foram considerados os seguintes dados no desenvolvimento dos experimentos:

- Aceleração da gravidade (g): $9,81 \text{ m/s}^2$
- Comprimento da lâmina (l): $0,14 \text{ m}$
- Densidade do alumínio (d): 2600 kg/m^3
- Módulo de rigidez do aço (E): $2,10 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$
- Momento de inércia da lâmina (I): $1,73 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4$
- Relação de massas (u): $0,5$
- Constante pi (π): $3,14$

De forma simplificada, a organização do procedimento experimental foi representada conforme a Figura 17.

Figura 17 - Simplificação do procedimento experimental.

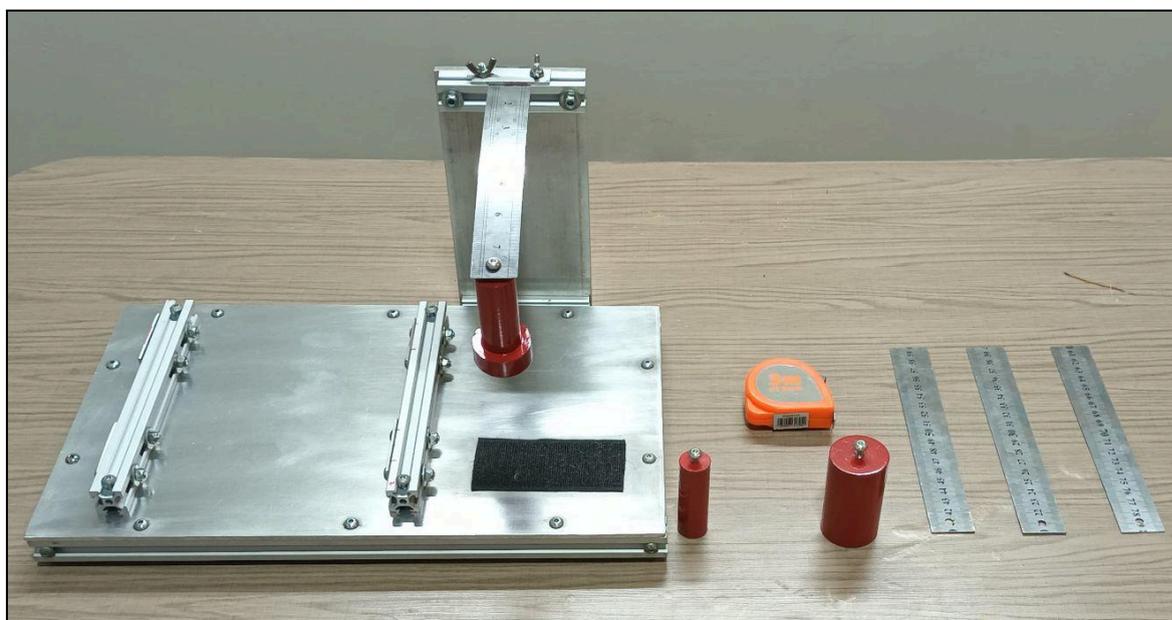


Fonte: Autores (2024).

4.2. Experimento 1 - Elementos de Rigidez da Estrutura Primária

O experimento 1 tratou dos elementos de rigidez da estrutura primária, das suas quatro lâminas de aço especificamente. Neste experimento, utilizou-se os três tarugos disponíveis (180g, 360g, 590g), a trena de mão, a estrutura base, as quatro lâminas da estrutura primária e a estrutura secundária. A estrutura secundária foi fixada na estrutura base perpendicularmente, seu perfil estrutural serviu como ponto de engaste para as lâminas de aço. Houve o acoplamento dos tarugos na extremidade das lâminas, e a medição de sua altura antes e após o acoplamento do tarugo. A configuração do sistema ficou conforme a Figura 18.

Figura 18 - Configuração do sistema do experimento 1.



Fonte: Autores (2024).

4.3. Experimento 2 - Elementos de Inércia da Estrutura Primária

O experimento 2 tratou dos elementos de inércia, ou massa, da estrutura primária, do conjunto chapa, perfil e acessórios embarcados (porcas, parafusos, arruelas, motor). Neste experimento, utilizou-se a balança digital e o conjunto chapa e perfil da estrutura primária. O conjunto foi colocado sobre a balança digital e observado seu peso. A configuração do sistema ficou disposta conforme a Figura 19.

Figura 19 - Configuração do sistema do experimento 2.

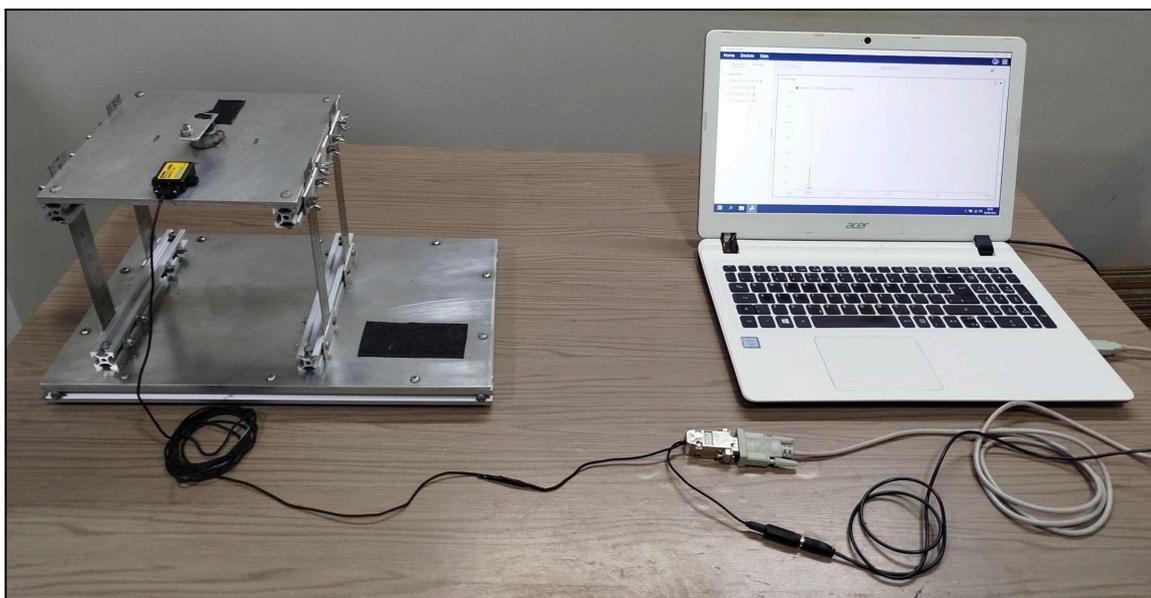


Fonte: Autores (2024).

4.4. Experimento 3 - Estrutura Primária sob Vibração Livre

O experimento 3 tratou da frequência de vibração natural da estrutura primária. Neste experimento, utilizou-se a IMU, o *laptop*, a estrutura base e a estrutura primária. A IMU foi fixada na estrutura primária, a qual foi engastada na estrutura base, e o *laptop* posicionado ao lado da bancada. No *software* SensorConnect, foi aberto um *dashboard* com a ferramenta *FFT Gauge* para a leitura de aceleração e frequência. De forma manual, por um “puxão” e soltura rápida, foi inserido um deslocamento inicial na mesa. Ao passo que o movimento vibratório se iniciou, foi possível recolher os dados de leitura da frequência do dispositivo pelo software. A configuração do sistema ficou conforme a Figura 20.

Figura 20 - Configuração do Sistema do experimento 3.

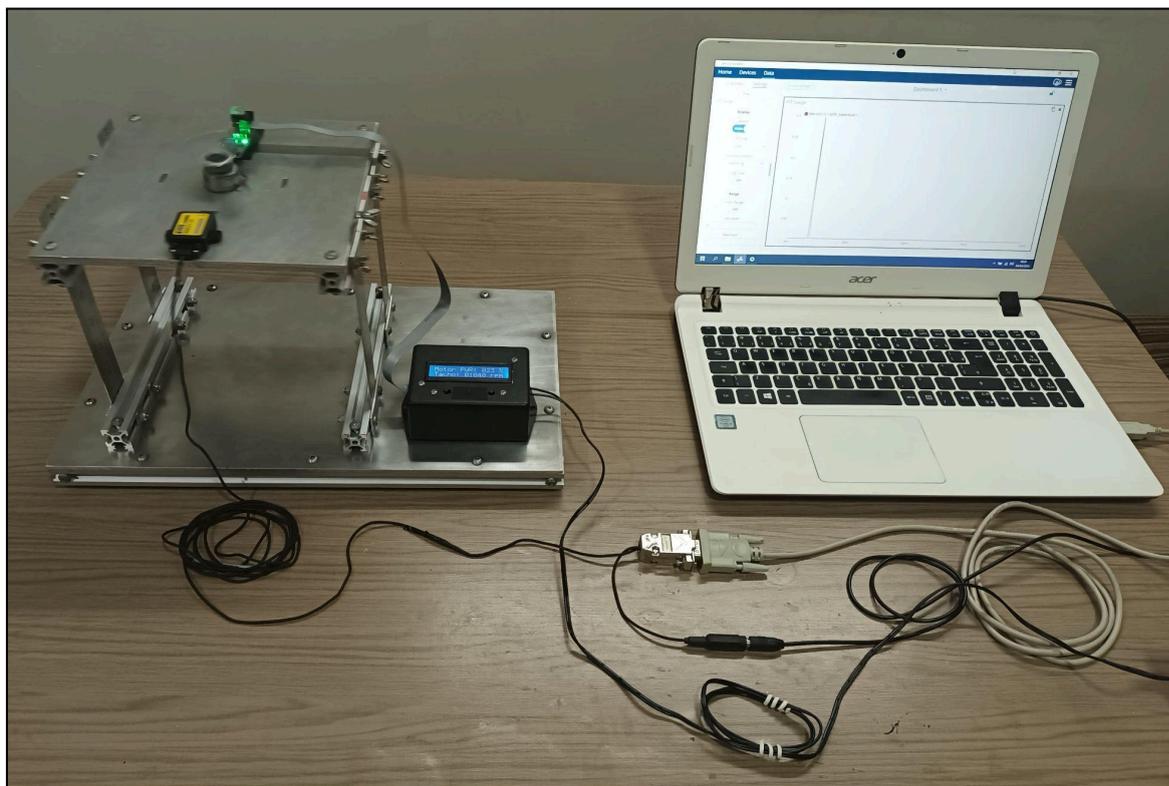


Fonte: Autores (2024).

4.5. Experimento 4 - Estrutura Primária sob Vibração Forçada

O experimento 4 tratou da frequência de vibração forçada sob a estrutura primária, dada pela rotação do motor desbalanceado. Neste experimento, utilizou-se a IMU, o *laptop*, a estrutura base, a estrutura primária e a interface eletrônica. A IMU foi fixada na estrutura primária, a qual foi engastada na estrutura base, e o *laptop* posicionado ao lado da bancada. No *software* SensorConnect foi aberto um *dashboard* com a ferramenta *FFT Gauge* para a leitura de aceleração e frequência. Pela central de controle, foi parametrizada a frequência de rotação do motor, cuja operação inseriu uma força de excitação harmônica na estrutura primária. Ao passo que o movimento vibratório se iniciou, a rotação do motor foi variada de modo a se obter a maior amplitude do sistema, a ressonância. Foi possível recolher os dados de leitura da frequência do dispositivo pelo software. A configuração do sistema ficou conforme a Figura 21.

Figura 21 - Configuração do sistema do experimento 4.

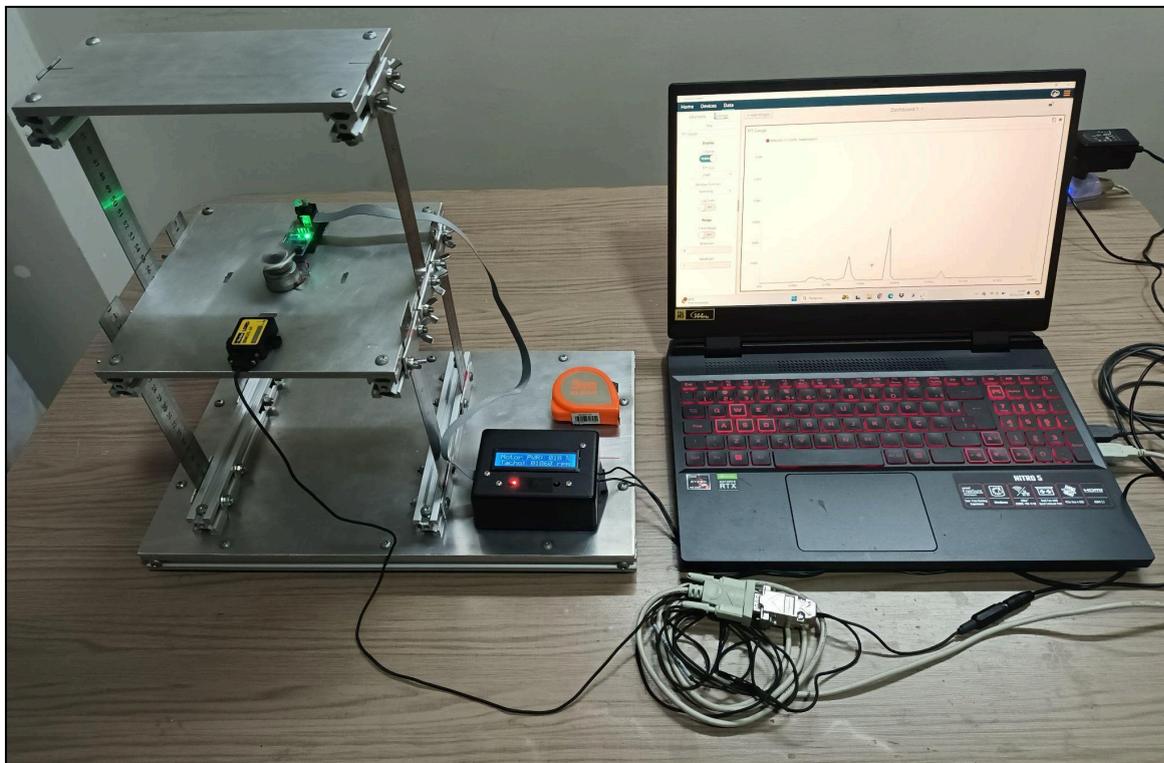


Fonte: Autores (2024).

4.6. Experimento 5 - Sintonização de ADV

O experimento 5 tratou da sintonização do ADV, ou seja, a frequência de vibração natural da estrutura secundária acoplada à estrutura primária. Neste experimento, utilizou-se a IMU, o *laptop*, a trena de mão, a estrutura base, primária, secundária e a interface eletrônica. A IMU foi fixada na estrutura primária, a qual foi engastada na estrutura base, e o *laptop* posicionado ao lado da bancada. A estrutura secundária foi fixada na estrutura primária. No *software* SensorConnect foi aberto um *dashboard* com a ferramenta *FFT Gauge* para a leitura de aceleração e frequência. Com a trena de mão, foi parametrizada a altura da estrutura secundária fixada na estrutura primária. Pela central de controle, foi parametrizada a frequência de rotação do motor, cuja operação inseriu uma força de excitação harmônica na estrutura primária. Ao passo que o movimento vibratório se iniciou, a rotação do motor foi variada de modo a se obter a menor amplitude do sistema na antiga frequência de ressonância. Foi possível recolher os dados de leitura da frequência do dispositivo pelo software. A configuração do sistema ficou conforme a Figura 22.

Figura 22 - Configuração do sistema do experimento 5.

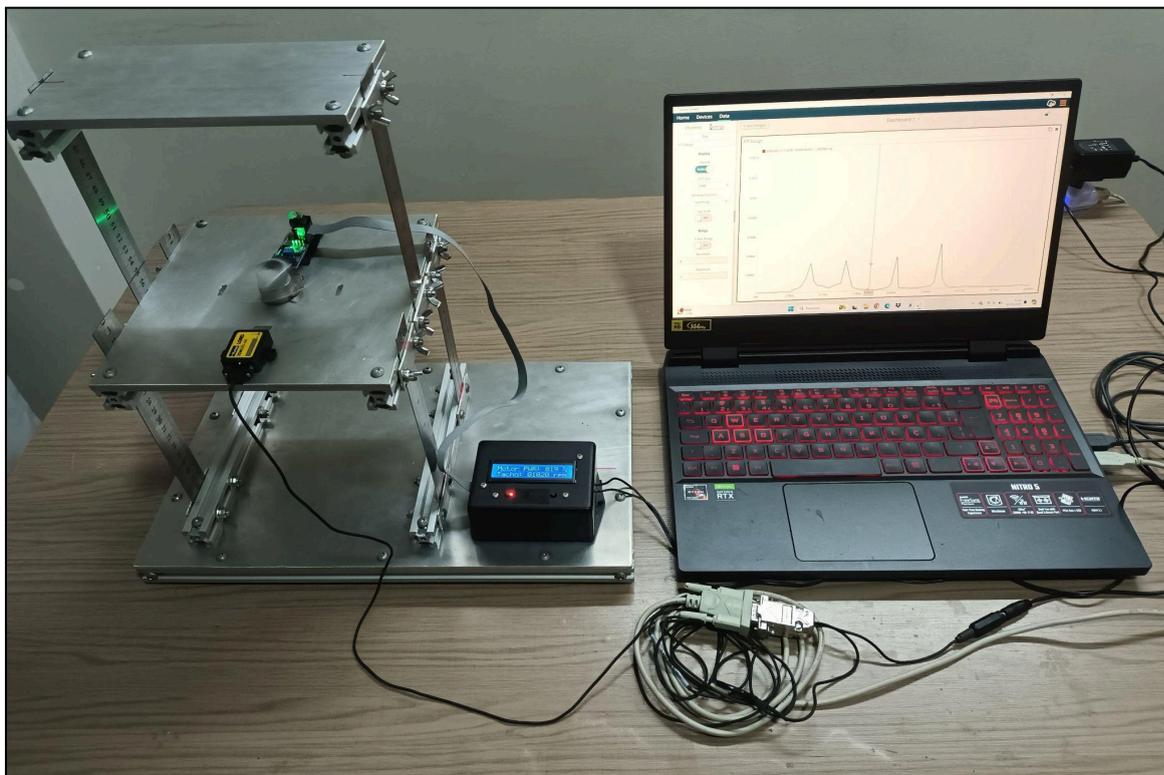


Fonte: Autores (2024).

4.7. Experimento 6 - Estrutura Primária sob Vibração Forçada com ADV

O experimento 6 tratou das frequências de vibração natural da estrutura final, a estrutura primária sob vibração forçada com ADV. Neste experimento, utilizou-se a IMU, o *laptop*, a estrutura base, primária, secundária e a interface eletrônica. A IMU foi fixada na estrutura primária, a qual foi engastada na estrutura base, e o *laptop* posicionado ao lado da bancada. A estrutura secundária foi fixada na estrutura primária. No *software* SensorConnect foi aberto um *dashboard* com a ferramenta *FFT Gauge* para a leitura de aceleração e frequência. Pela central de controle, foi parametrizada a frequência de rotação do motor, cuja operação inseriu uma força de excitação harmônica na estrutura primária. Ao passo que o movimento vibratório se iniciou, a rotação do motor foi variada de modo a se obter a maior amplitude do sistema, a ressonância. Foi possível recolher os dados de leitura da frequência do dispositivo pelo software. A configuração do sistema ficou conforme a Figura 23.

Figura 23 - Configuração do sistema do experimento 6.



Fonte: Autores (2024).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Introdução

Nesta fase foram tratados os resultados do procedimento experimental. Para cada experimento foi feita uma análise teórica, prática, dos desvios e a interpretação dos resultados. Nas análises teóricas, a modelagem do sistema, a indicação das equações governantes e os valores teóricos calculados. Nas análises práticas, a indicação do princípio do experimento e os valores práticos observados. Nas análises de desvios, o cálculo da variação dos valores dos experimentos. E, por fim, na interpretação dos resultados, os motivos pelos resultados obtidos.

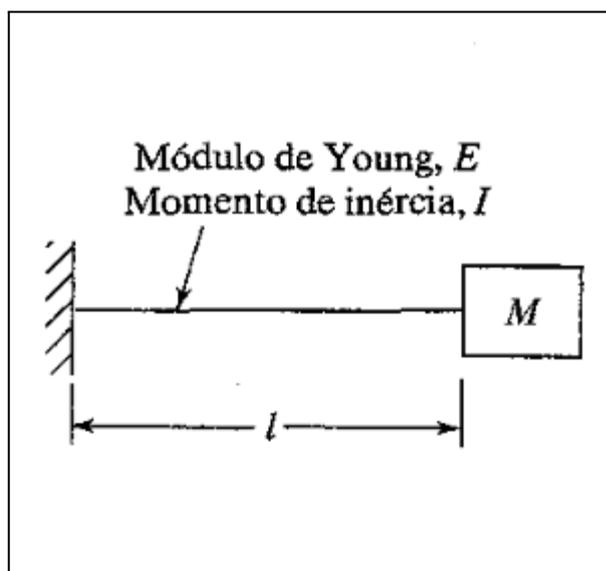
O cálculo base para a realização das análises de desvios foi definido conforme a Equação 39.

$$Desvio (\%) = \frac{|Valor Teórico - Valor Prático|}{Valor Teórico} \cdot 100 \quad (39)$$

5.2. Experimento 1 - Elementos de Rigidez da Estrutura Primária

Sob análise teórica, a modelagem do sistema representado (Figura 24) foi de uma viga em balanço com uma carga M na extremidade. A partir da Equação 1, com os valores pré-definidos de E , I e l , os quais são os mesmos para todas as vigas, a rigidez dos elementos k_1, k_2, k_3, k_4 , foi definida na Equação 40 e a rigidez equivalente na Equação 41.

Figura 24 - Modelagem do sistema do experimento 1.



Fonte: Adaptado de Rao (2008).

$$k_{1,2,3,4} = (3 \cdot E \cdot I) / l^3 \quad (40)$$

$$k_{1,2,3,4} = (3 \cdot 210E^9 \cdot 1,73E^{-12}) / 0,14^3$$

$$k_{1,2,3,4} = 397,20 \text{ N/m}$$

$$k_{eq} = 4 \cdot k_1 \quad (41)$$

$$k_{eq} = 1588,78 \text{ N/m}$$

Sob análise prática, a rigidez das lâminas de aço foi dada pela relação da força peso dos tarugos com a variação de altura correspondente. Os valores práticos observados foram dispostos na Tabela 6 e a rigidez calculada nas Equações 42-47.

Tabela 6 - Valores de deslocamento dos elementos de rigidez.

| Valores de Deslocamento dos Elementos de Rigidez | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| Lâmina de Aço | Tarugo 1 (1,765 N) | Tarugo 2 (3,530 N) | Tarugo 3 (5,786 N) |
| 1 | 0,0045 | 0,0095 | 0,016 |
| 2 | 0,005 | 0,010 | 0,0165 |
| 3 | 0,0105 | 0,0205 | 0,032 |
| 4 | 0,0105 | 0,021 | 0,033 |

Fonte: Autores (2024).

$$k_n = ((F_{t1}/x_{t1}) + (F_{t2}/x_{t2}) + (F_{t3}/x_{t3})) / 3 \quad (42)$$

$$k_1 = 375,03 \text{ N/m} \quad (43)$$

$$k_2 = 352,20 \text{ N/m} \quad (44)$$

$$k_3 = 173,67 \text{ N/m} \quad (45)$$

$$k_4 = 170,43 \text{ N/m} \quad (46)$$

$$k_{eq} = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 \quad (47)$$

$$k_{eq} = 1071,33 \text{ N/m}$$

O valor de desvio em porcentagem foi descrito conforme a Equação 48.

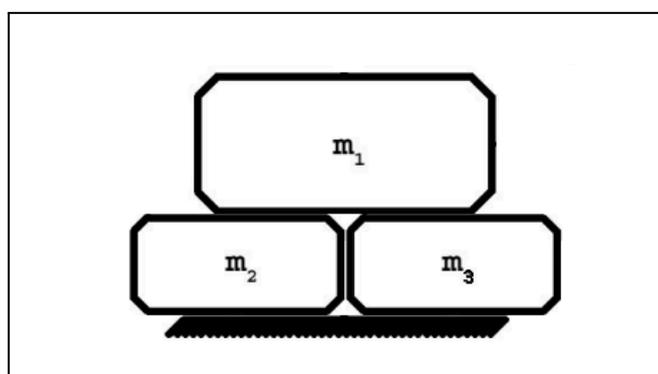
$$Desvio \ k_{eq} (\%) = \frac{|1588 - 1071|}{1588} \cdot 100 = 32\% \quad (48)$$

O desvio dos valores práticos com os teóricos foi alto. A rigidez das lâminas na prática é menor que a teórica. Os fatores que podem ter colaborado para isto são a qualidade do material, o modo de fixação e medição. As lâminas de aço compradas são comuns, não há nenhuma garantia de composição de material ou performance de suas propriedades. O modo de ajuste de fixação e medição, manual e visual, limita a precisão dos valores observados no alinhamento de referência da linha do centro do furo na extremidade da lâmina para com o ponto de engaste ou para com a superfície da estrutura base por paralaxe na medição e tremores leves da mão do observador.

5.3. Experimento 2 - Elementos de Inércia da Estrutura Primária

Sob análise teórica, a modelagem do sistema representado (Figura 25) foi três elementos, m_1 sendo a chapa de alumínio, m_2 e m_3 sendo os perfis de fixação da chapa. A partir da Equação 3, com o valor pré-definido g , a massa dos elementos foi definida nas Equações 49 e 50. Também, a massa equivalente da mesa da estrutura primária m_{eq} na Equação 51.

Figura 25 - Modelagem do sistema do experimento 2.



Fonte: Autores (2024).

$$m_1 = 2600 \cdot (0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,00635) = 0,660 \text{ kg} \quad (49)$$

$$m_{2,3} = 2600 \cdot (0,02 \cdot 0,02 \cdot 0,2) = 0,208 \text{ kg} \quad (50)$$

$$m_{eq} = m_1 + m_2 + m_3 \quad (51)$$

$$m_{eq} = 1,076 \text{ kg}$$

Sob análise prática, a massa equivalente da estrutura primária foi dada pela relação da força peso dos elementos do conjunto somados com a aceleração da gravidade. O valor observado foi demonstrado na Figura 26 e a massa calculada na Equação 52.

Figura 26 - Valor de força peso da mesa da estrutura primária.



Fonte: Autores (2024).

$$m_{eq} = 10,53 / 9,81 \quad (52)$$

$$m_{eq} = 1,073 \text{ kg}$$

O valor de desvio em porcentagem foi descrito conforme a Equação 53.

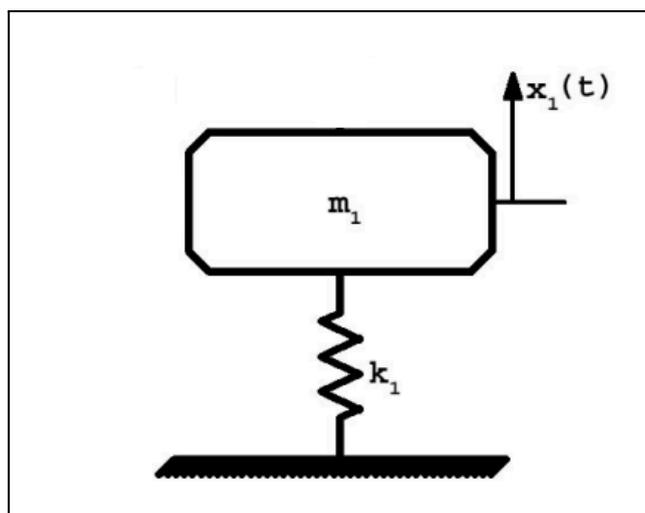
$$\text{Desvio } m_{eq} (\%) = \frac{|1,076 - 1,073|}{1,076} \cdot 100 = 0,3\% \quad (53)$$

O desvio dos valores práticos com os teóricos foi baixo. As massas dos conjuntos são quase idênticas. O fator que colaborou para isto foi os perfis de alumínio serem considerados na teoria de volume maciço. Na prática são vazados, com furo no centro e rasgos nos seus lados, o valor da soma dos acessórios do conjunto chapa e perfil (porcas, parafusos, arruelas e motor) compensou o volume teórico excedente contabilizado.

5.4. Experimento 3 - Estrutura Primária sob Vibração Livre

Sob análise teórica, a modelagem do sistema representado (Figura 27) foi uma estrutura de um grau de liberdade composta por uma massa m_1 e por uma mola k_1 sem a incidência de uma força externa. A partir da Equação 7, com os valores teóricos dos experimentos 1 e 2, a frequência de vibração natural ω_{n1} foi definida na Equação 54.

Figura 27 - Modelagem do sistema do experimento 3.



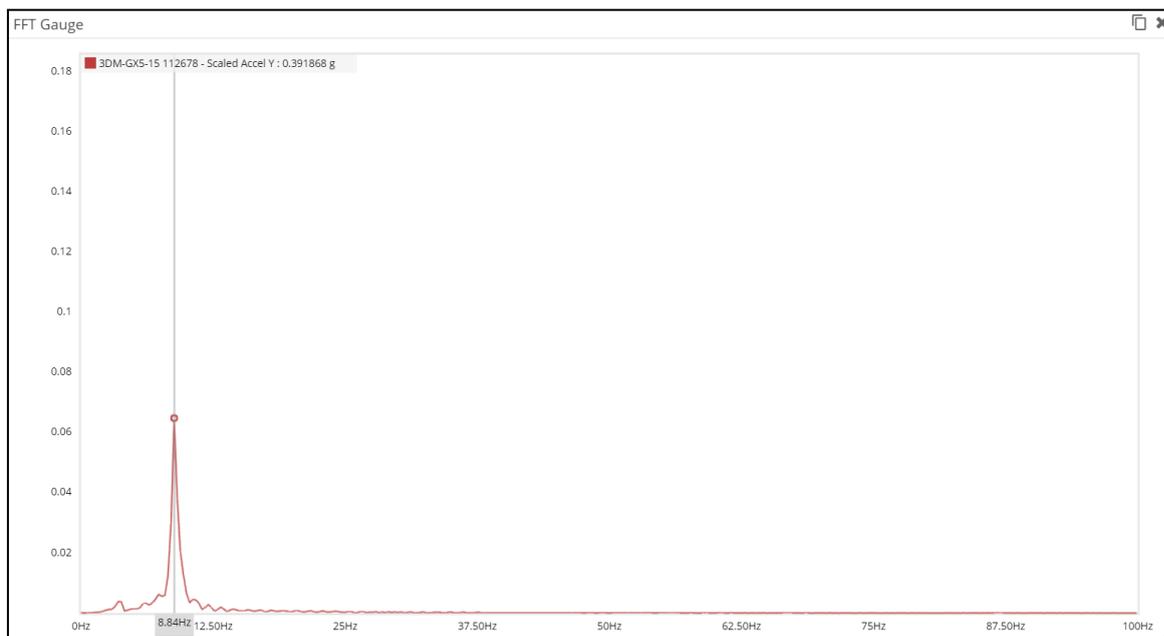
Fonte: Autores (2024).

$$\omega_{n1} = \sqrt{(k_{eq}/m_{eq})} \quad (54)$$

$$\omega_{n1} = \sqrt{(1588,78/1,076)} = 38,42 \text{ rad/s}$$

Sob análise prática, a frequência de vibração natural do sistema foi dada pela ferramenta *FFT Gauge* da IMU. Em sua leitura, quando em movimento iniciado pelo usuário, apresentou uma amplitude de aceleração alta em uma frequência apenas. Os valores práticos observados foram dispostos na Figura 28 e a frequência de vibração natural calculada na Equação 55.

Figura 28 - Valores práticos observados do experimento 3.



Fonte: Autores (2024).

$$\omega_{n1} = 2\pi \cdot 8,84 \quad (55)$$

$$\omega_{n1} = 55,54 \text{ rad/s}$$

O valor de desvio em porcentagem foi descrito conforme a Equação 56.

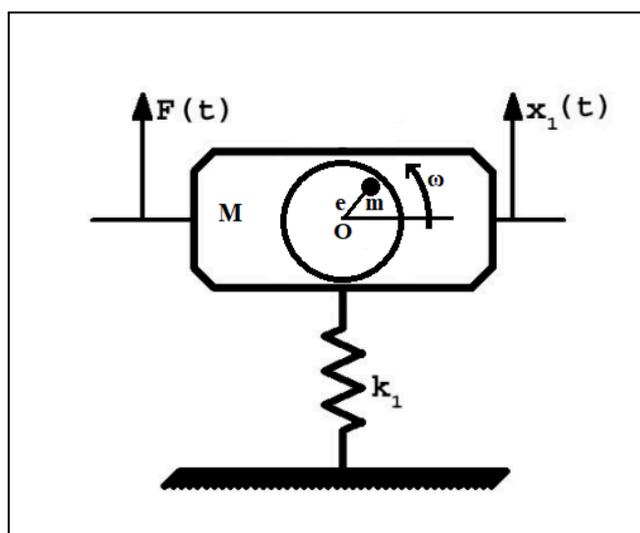
$$\text{Desvio } \omega_{n1} (\%) = \frac{|38,42 - 55,54|}{38,42} \cdot 100 = 44\% \quad (56)$$

O desvio dos valores práticos com os teóricos foi alto. A frequência de vibração natural na prática é maior que a teórica, conseqüentemente, a rigidez prática também é maior. O fator que pode ter colaborado para isto é o modo de ajuste de fixação das lâminas. A chapa de fixação usada não engasta uniformemente as lâminas numa linha de referência confiável, além de suas formas e furos serem irregulares. Isto combinado com erros de perpendicularidade das lâminas, desalinhamento e desnivelamento da mesa, pode variar a rigidez da estrutura final e, por sua vez, a frequência de vibração natural.

5.5. Experimento 4 - Estrutura Primária sob Vibração Forçada

Sob análise teórica, a modelagem do sistema representado (Figura 29) foi uma estrutura de um grau de liberdade composta por uma massa M , uma mola k_1 e com a incidência de uma força de excitação harmônica externa $F(t)$. A partir da Equação 19, com o valor teórico do experimento 3, a frequência de vibração forçada ω foi definida na Equação 57.

Figura 29 - Modelagem do sistema do experimento 4.



Fonte: Autores (2024).

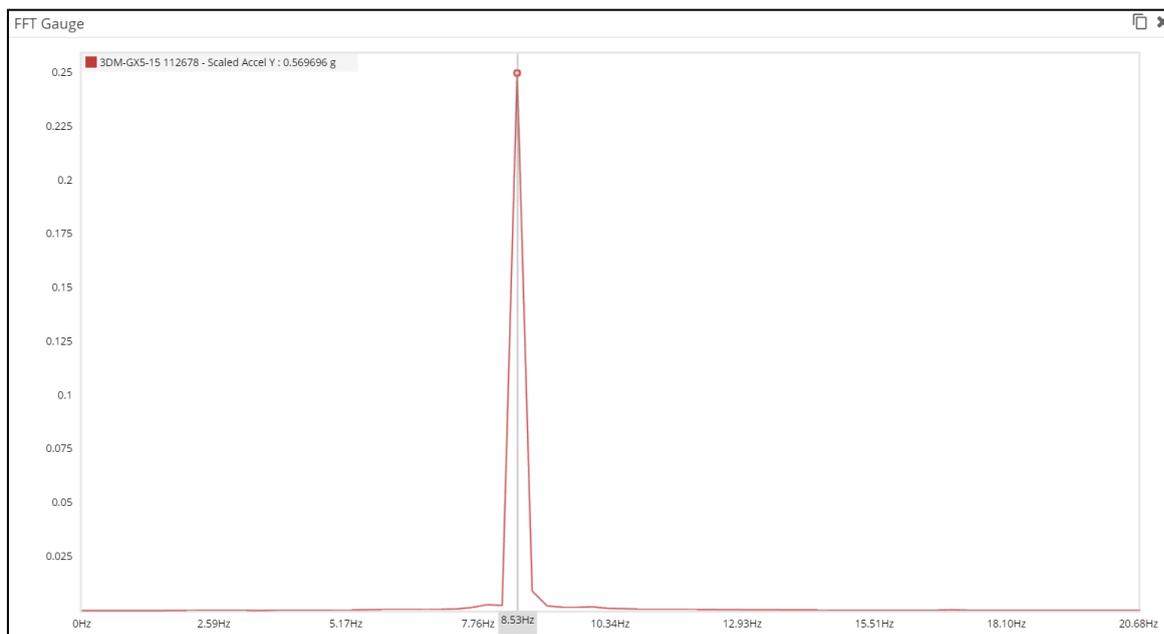
$$\beta = 1 / (1 - (\omega/\omega_{n1})^2) \quad (57)$$

$$1 - (\omega/\omega_{n1})^2 = 0$$

$$\omega = \omega_{n1} = 38,42 \text{ rad/s}$$

Sob análise prática, a frequência de vibração forçada do sistema foi dada pela ferramenta *FFT Gauge* da IMU. Em sua leitura, quando em movimento iniciado pela operação do motor, apresentou uma amplitude de aceleração alta em uma frequência apenas. Os valores práticos observados foram dispostos na Figura 30 e a frequência de vibração forçada calculada na Equação 58.

Figura 30 - Valores práticos observados do experimento 4.



Fonte: Autores (2024).

$$\omega = 2\pi \cdot 8,53 \quad (58)$$

$$\omega = 53,59 \text{ rad/s}$$

O valor de desvio em porcentagem foi descrito conforme a Equação 59.

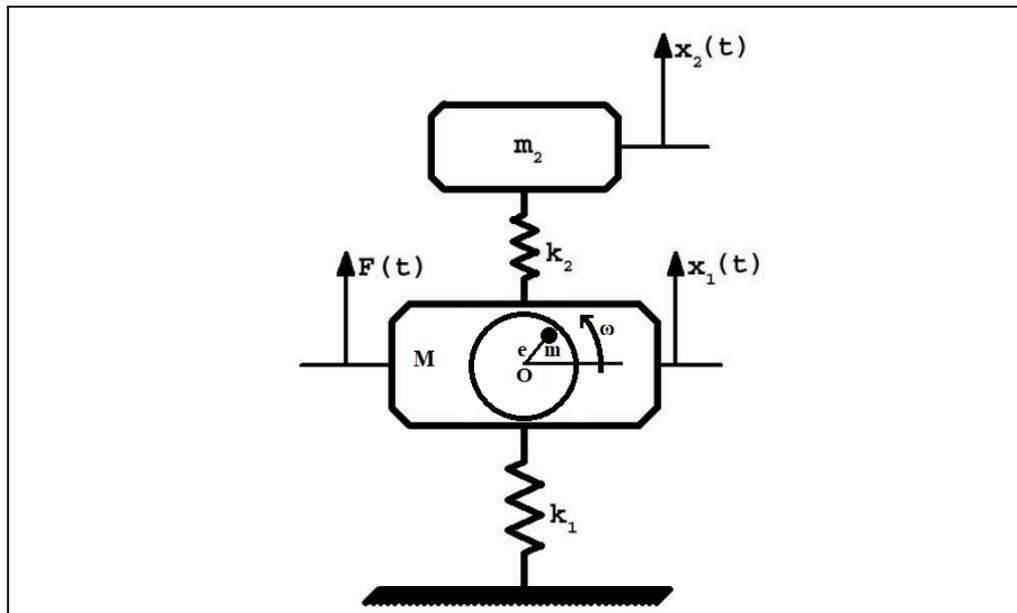
$$\text{Desvio } \omega(\%) = \frac{|38,42 - 53,59|}{38,42} \cdot 100 = 39\% \quad (59)$$

O desvio dos valores práticos com os teóricos foi alto. A frequência de vibração forçada na prática foi maior que a teórica, cujo valor foi influenciado pela frequência de vibração natural teórica do experimento 3, onde já havia discrepância. Observa-se também que há uma sutil diferença dos valores de frequência de vibração práticos do experimento 3 para o 4, o fator que pode ter colaborado para isto é a massa da estrutura base. A estrutura base foi projetada para não só fixar a estrutura primária, mas também isolar o sistema vibratório. No entanto, sua massa não é alta o suficiente para, quando o sistema estiver operando em ressonância, não participar dele. Quando o motor desbalanceado inicia sua rotação, na ressonância, todo o conjunto entra em regime de vibração, inclusive a estrutura base. Essa participação nova, combinada com pequenos deslizamentos nos apoios interfere na frequência de vibração do sistema.

5.6. Experimento 5 - Sintonização de ADV

Sob análise teórica, a modelagem do sistema representado (Figura 31) foi uma estrutura de dois graus de liberdade, com a estrutura primária, composta por uma massa M , uma mola k_1 e com a incidência de uma força de excitação harmônica externa $F(t)$, e a estrutura secundária, por uma massa m_2 e uma mola k_2 . A partir das Equações 27, 34 e 1, com o valor pré-definido u e os valores teóricos dos experimentos 4 e 2, a frequência natural de vibração da estrutura secundária ω_{n2} , massa da estrutura secundária m_2 , rigidez da estrutura secundária k_2 e altura da lâmina da estrutura secundária l_2 foram definidas nas Equações 60, 61, 62 e 63.

Figura 31 - Modelagem do sistema do experimento 5.



Fonte: Autores (2024).

$$\omega_{n2} = \omega = 38,42 \text{ rad/s} \quad (60)$$

$$m_2 = u \cdot m_1 = 0,5 \cdot 1,076 = 0,538 \text{ kg} \quad (61)$$

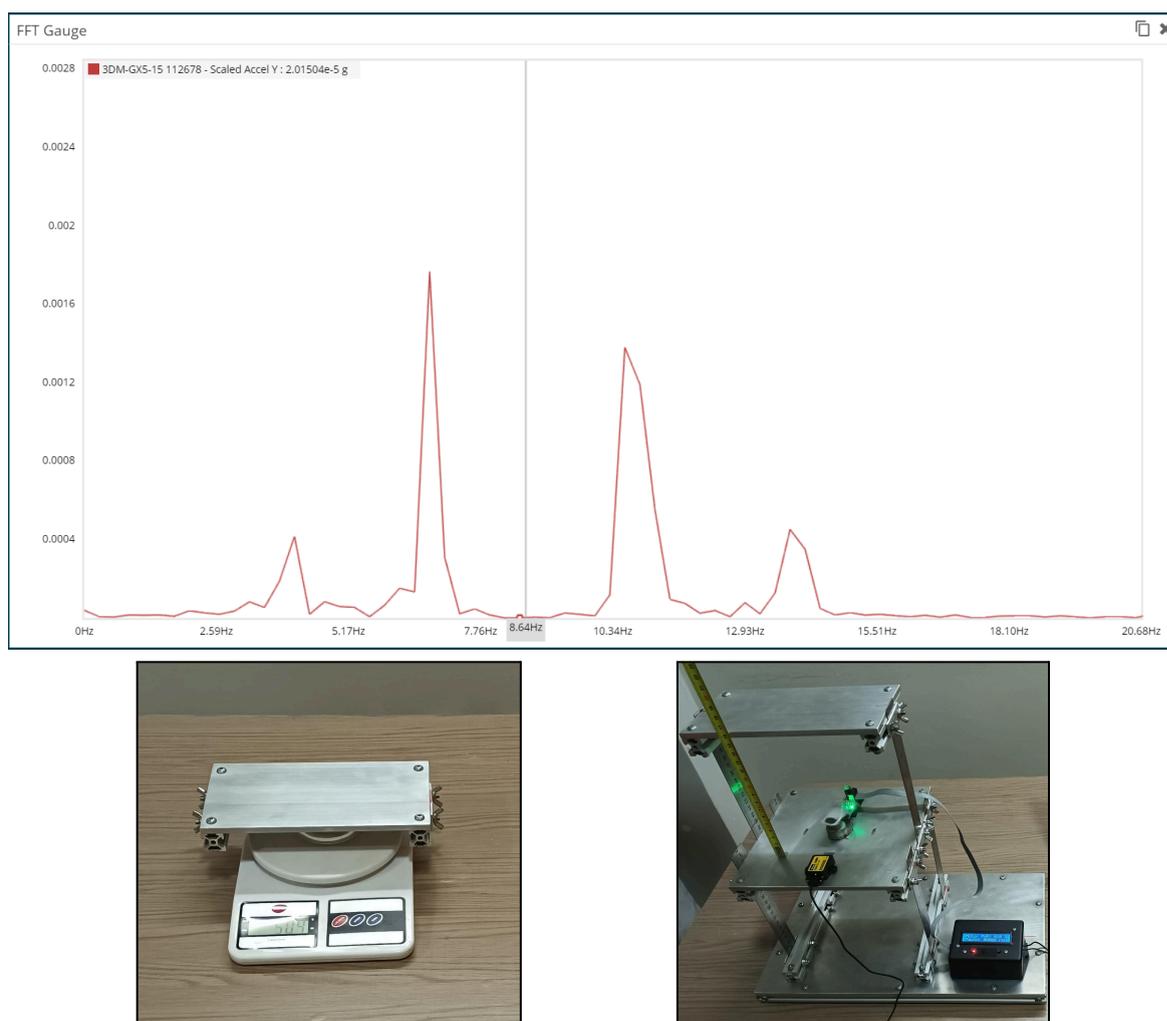
$$k_2 = (\omega^2 \cdot m_2) / 2 \quad (62)$$

$$k_2 = (44,63^2 \cdot 0,538) / 2 = 397,07 \text{ N/m}$$

$$l = \sqrt[3]{(3 \cdot 210E^+9 \cdot 1,73E^{-12}) / 397,07} = 0,14 \text{ m} \quad (63)$$

Sob análise prática, a massa da mesa da estrutura secundária é fixa, portanto, somente os parâmetros de rigidez são ajustados, através da regulação da altura das lâminas. A frequência de vibração natural do sistema foi dada pela ferramenta *FFT Gauge* da IMU. Em sua leitura, quando em movimento iniciado pela operação do motor, apresentou uma amplitude de aceleração baixa na antiga frequência de ressonância. Também, nesta sintonização, ocorreu o surgimento de frequências adjacentes com comportamento dinâmico. Para se obter melhor assertividade na determinação da frequência de vibração natural do ADV, foi estabelecido o ponto no centro das frequências observadas como a frequência sintonizada. Os valores práticos observados foram dispostos na Figura 32, a frequência de vibração natural, massa, rigidez calculadas e o comprimento da lâmina observados nas Equações 64, 65, 66 e 67.

Figura 32 - Valores práticos observados do experimento 5.



Fonte: Autores (2024).

$$\omega_{n2} = 2\pi \cdot 8,64 = 54,28 \text{ rad/s} \quad (64)$$

$$m_2 = 4,94/9,81 = 0,503 \text{ kg} \quad (65)$$

$$k_2 = (54,28^2 \cdot 0,503) / 2 = 741,18 \text{ N/m} \quad (66)$$

$$l_2 = 0,1385 \quad (67)$$

O valor de desvio em porcentagem foi descrito conforme as Equações 68, 69, 70 e 71.

$$\text{Desvio } \omega_{n2}(\%) = \frac{|54,28 - 38,42|}{38,42} \cdot 100 = 41\% \quad (68)$$

$$\text{Desvio } m_2(\%) = \frac{|0,538 - 0,504|}{0,538} \cdot 100 = 6,3\% \quad (69)$$

$$\text{Desvio } k_2(\%) = \frac{|397,07 - 741,18|}{397,07} \cdot 100 = 87\% \quad (70)$$

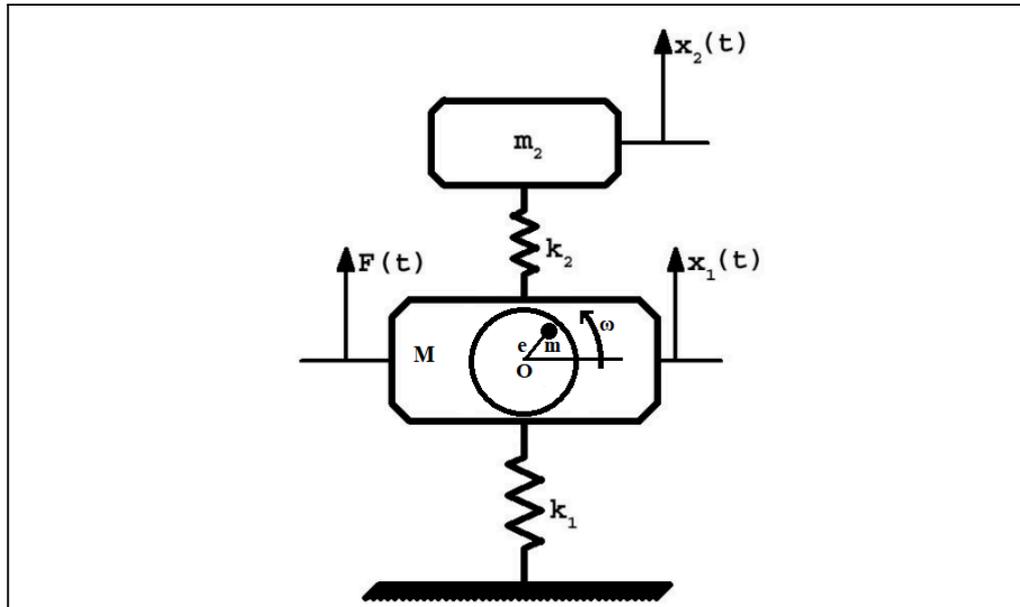
$$\text{Desvio } l_2(\%) = \frac{|0,14 - 0,1385|}{0,14} \cdot 100 = 1\% \quad (71)$$

Os desvios dos valores práticos com os teóricos para a massa e o comprimento da lâmina do ADV foram baixos, já para a rigidez e frequência natural de vibração do ADV foram altos. Ou seja, o ADV construído na prática tem uma massa muito próxima à planejada na teoria, e apresentou uma rigidez nas lâminas semelhante a da estrutura primária, com isso teve o valor de comprimento da lâmina também próximo dela. Observa-se uma proporção fiel nesses resultados. A rigidez e frequência de vibração natural do ADV na prática foram maiores que o previsto na teoria, os desvios foram influenciados pela frequência de vibração forçada teórica do experimento 4, onde já havia discrepância.

5.7. Experimento 6 - Estrutura Primária sob Vibração Forçada com ADV

Sob análise teórica, a modelagem do sistema representado (Figura 33) foi uma estrutura de dois graus de liberdade, com a estrutura primária, composta por uma massa M , uma mola k_1 e com a incidência de uma força de excitação harmônica externa $F(t)$, e a estrutura secundária, por uma massa m_2 e uma mola k_2 . A partir das Equações 38 e 33, com o valor pré-definido de u e o valor teórico do experimento 3, as relações de frequências, g_1 e g_2 , e as frequências naturais de vibração da estrutura final, ω_{g1} e ω_{g2} , foram definidas nas Equações 72, 73, 74 e 75.

Figura 33 - Modelagem do sistema do experimento 6.



Fonte: Autores (2024).

$$g_1 = \left[1 + \frac{0,5}{2} + \sqrt{\left(0,5 + \frac{0,5^2}{4}\right)} \right]^{1/2} = 1,41 \quad (72)$$

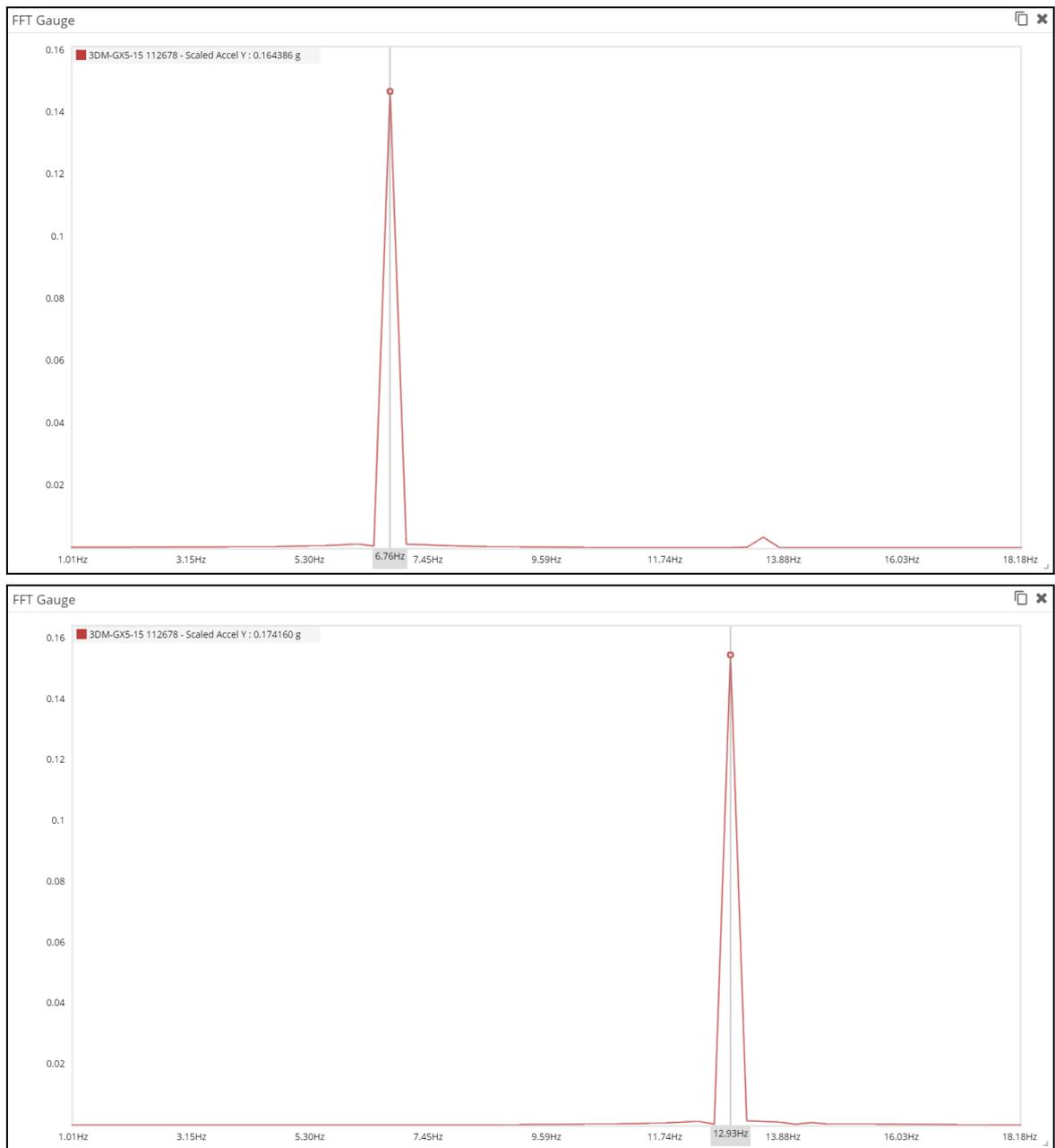
$$g_2 = \left[1 + \frac{0,5}{2} - \sqrt{\left(0,5 + \frac{0,5^2}{4}\right)} \right]^{1/2} = 0,71 \quad (73)$$

$$\omega_{g1} = g_1 \cdot \omega_{n1} = 1,41 \cdot 38,42 = 54,17 \text{ rad/s} \quad (74)$$

$$\omega_{g2} = g_2 \cdot \omega_{n1} = 0,71 \cdot 38,42 = 27,27 \text{ rad/s} \quad (75)$$

Sob análise prática, as frequências de vibração natural do sistema foi dada pela ferramenta *FFT Gauge* da IMU. Em sua leitura, quando em movimento iniciado pela operação do motor, apresentou uma amplitude de aceleração alta em duas frequências adjacentes. Os valores práticos observados foram dispostos na Figura 34, as frequências de vibração naturais e as relações de frequências calculadas nas Equações 76, 77, 78 e 79.

Figura 34 - Valores práticos observados do experimento 6.



Fonte: Autores (2024).

$$\omega_{g1} = 2\pi \cdot 12,93 = 81,24 \text{ rad/s} \quad (76)$$

$$\omega_{g2} = 2\pi \cdot 6,76 = 42,47 \text{ rad/s} \quad (77)$$

$$g_1 = \omega/\omega_{n1} = 12,93/8,84 = 1,46 \text{ rad/s} \quad (78)$$

$$g_2 = \omega/\omega_{n1} = 6,76/8,84 = 0,76 \text{ rad/s} \quad (79)$$

O valor de desvio em porcentagem foi descrito conforme as equações 80, 81, 82 e 83.

$$\text{Desvio } \omega_{g1}(\%) = \frac{|54,17 - 81,24|}{54,17} \cdot 100 = 50\% \quad (80)$$

$$\text{Desvio } \omega_{g2}(\%) = \frac{|27,27 - 42,47|}{27,27} \cdot 100 = 55\% \quad (81)$$

$$\text{Desvio } g_1(\%) = \frac{|1,41 - 1,46|}{1,41} \cdot 100 = 3,5\% \quad (82)$$

$$\text{Desvio } g_2(\%) = \frac{|0,71 - 0,76|}{0,71} \cdot 100 = 7\% \quad (83)$$

Os desvios dos valores práticos com os teóricos foram baixos para a relação de frequências e altos para as frequências de vibração naturais. Ou seja, o ADV construído na prática tem uma relação de proporção com a estrutura primária fiel à planejada na teoria. As frequências de vibração naturais da estrutura final na prática foi maior que a teórica, cujo valor foi influenciado pela frequência de vibração natural teórica do experimento 3, onde já havia discrepância.

6. CONCLUSÃO

Compreendida a importância do estudo de vibrações e da abordagem prática na fase acadêmica do projetista de estruturas, a solução proposta não se equivale a infraestrutura fornecida por um laboratório de vibrações. No entanto, a ferramenta didática desenvolvida, atendendo positivamente as análises metodológicas, pode trazer benefícios aos estudantes.

A infraestrutura requerida nos principais processos de fabricação envolvidos (corte, furo, montagem) foi apenas de uma oficina mecânica simples, embora tenha sido utilizada uma oficina privada, o trabalho realizado pode ser feito na própria faculdade. A mão de obra contou com a experiência técnica em mecânica dos autores, e pode ser facilmente reproduzida por um técnico na área ou professor na faculdade. A composição da bancada foi de materiais disponíveis no mercado em loja virtual, ou em plataforma de comércio eletrônico, e a soma dos custos não supera um salário mínimo.

Para ser utilizada em sala de aula na faculdade, a bancada possui peso e dimensão para ser carregada, e pode até ser desmontada por partes no transporte (estrutura base, primária, secundária, interface eletrônica). Seu ajuste é manual, exige ferramentas simples como uma trena de mão e esquadro, e talvez um nível de bolha, portanto, tem baixa precisão de ajuste. O espaço físico para sua operação é simples, uma mesa comum e um ponto de tomada disponível na faculdade. A resposta dos ensaios é observada de forma visual pela amplitude do movimento de vibração da bancada em operação. Tem um método de medição bem grosseiro ainda, uma implementação de um sistema de medição por acelerômetro e sensor de deslocamento por ultrassom ou feixe de luz pode melhorar isso.

Como bem esperado, ocorreu desvios dos valores teóricos com os práticos relativamente altos, isto se deve a diversos fatores tanto do material, quanto do processo de ensaio e prática do operador. A qualidade dos materiais, a precisão de ajuste e medição dos ensaios, a própria experiência do operador com a bancada pode assegurar desvios menores.

O desenvolvimento da bancada didática de ensaio de vibração permite que o projetista de estruturas tenha uma ferramenta complementar na disciplina de vibrações na faculdade. Embora a ferramenta desenvolvida tenha desvios e limitações inerentes, em termos de economia, praticidade e fidelidade, pode-se considerar uma solução factível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, B. Y. H. **Desenvolvimento de uma Bancada Didática para Determinação da Constante Elástica da Mola**. 40f. Trabalho de Graduação - FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal, Tecnólogo em Projetos de Estruturas Aeronáuticas, 2022.

JM1-JORNAL DAS MONTANHAS. **Mineirão terá 166 amortecedores de alta performance**. Disponível em <https://www.jm1.com.br/esportes/mineirao-tera-166-amortecedores-de-alta-performance.html>, 26 de Julho de 2011. Acesso em: 20/01/2024.

KOTINDA, G. L. **Absorvedor dinâmico de vibração tipo lâmina vibrante**. 120f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2008.

CUNHA JR., S. S. **Estudo Teórico e Numérico de Absorvedores Dinâmicos de Vibrações**, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, 1999.

MARQUES, R. F. A. **Estudo Teórico e Numérico de Absorvedores Dinâmicos de Vibrações Ativos e Adaptativos**. 108f. Dissertação de Mestrado, Universidade de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2000.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas, 4ª edição**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

APÊNDICE A – RELAÇÃO DE BENS E SERVIÇOS REQUERIDOS

A.1 Perfis Estruturais - Fornecedor Forseti Soluções

Figura 35 - Perfis estruturais e acessórios.

| Produto | Preço unitário | Quantidade | Subtotal |
|---|----------------|------------|-------------------|
| Pé Nivelador com Base 18mm Unidades: 4un Rosca: M6 Estoque: 5 dias úteis | R\$ 12,15 | 1 | R\$ 12,15 |
| Parafuso Allen Cabeça Abaulada M6 Comprimento do Parafuso: 16mm Unidades: 10un Estoque: 2 dias úteis | R\$ 7,19 | 1 | R\$ 7,19 |
| Parafuso Allen Cabeça Abaulada M5 Comprimento do Parafuso: 30mm Unidades: 50un Estoque: 2 dias úteis | R\$ 23,96 | 1 | R\$ 23,96 |
| Porca Auto Travante Parlock Unidades: 50un Rosca: M5 Estoque: 2 dias úteis | R\$ 11,98 | 1 | R\$ 11,98 |
| Perfil Estrutural em Alumínio 20x20 V-Slot - Canal 6 Estoque: 2 dias úteis | R\$ 0,36 | 240 | R\$ 86,40 |
| Subtotal: | | | R\$ 141,68 |
| Frete: | | | R\$ 32,65 |
| Cupom utilizado: OLAMAKER | | | |
| Desconto: | | | R\$ -13,81 |
| Valor total: | | | R\$ 160,52 |
| <p>Valores dos produtos:</p> <p>#pf20-11-c6 Perfil Estrutural em Alumínio 20x20 V-Slot - Canal 6: Comprimento: 500mm Quantidade: 2 Serviço: Furo p/ passagem de chave allen p/ montagem padrão Detalhes: Furo simples p/ passagem de chave allen 2 lados =====</p> <p>Comprimento: 200mm Quantidade: 2 Serviço: Rosca Detalhes: Rosca 2 lados(15mm de comprimento) =====</p> <p>Comprimento: 200mm Quantidade: 4 Serviço: Furo p/ passagem de chave allen p/ montagem padrão Detalhes: Furo simples p/ passagem de chave allen 2 lados =====</p> <p>Comprimento: 50mm Quantidade: 4 Serviço: Furo p/ passagem de chave allen p/ montagem padrão Detalhes: Furo simples p/ passagem de chave allen 2 lados</p> | | | |

Fonte: Autores (2024).

A.2 Chapas de Alumínio - Fornecedor Alumínio Alure

Figura 36 - Chapa de alumínio da estrutura base e estrutura primária.

| RECEBEMOS DE Alure Comercio de Metais Eireli OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO | | NF-e Nº 024740 Série 1 | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|--|--------------------------|----|----------------|----------|---|---------|----------------|---------|--------|------|
| Data de recebimento | Identificação e assinatura do receptor | | | | | | | | | | | | |
|  <p>Alure Comercio de Metais Eireli Rua Major Sertório, 344, Lqja, Vila Buarque 01.222-000 - São Paulo - SP Fone (11) 3129-9002 www.aluminioalure.com.br - aluminioalure@gmail.com</p> | | <p>DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica</p> <p>0-Entrada 1-Saída</p> <p>Nº 024740 SERIE: 1 Página: 1 de 1</p> | <p>Controle do Fisco</p>  <p>Chave de acesso 3522 1036 4297 2400 0100 5500 1000 0247 4012 5133 2873</p> <p>Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz autorizadora</p> | | | | | | | | | | |
| Natureza da operação Venda de mercadoria a não contribuinte | | Protocolo de autorização de uso 135221429217964 18/10/2022 15:37:52 | | | | | | | | | | | |
| Inscrição Estadual 128583206115 | Inscr.est. do subst.trib. | CNPJ 36.429.724/0001-00 | | | | | | | | | | | |
| Destinatário/Remetente | | Data emissão 18/10/2022 | | | | | | | | | | | |
| Nome / Razão Social Elieser Gabriel Silva Correa Siqueira | CNPJ/CPF | Inscrição Estadual | Data saída 18/10/2022 | | | | | | | | | | |
| Endereço | Bairro | CEP | Hora saída 15:37:51 | | | | | | | | | | |
| Município São José dos Campos | Fone/Fax | UF SP | | | | | | | | | | | |
| Faturas | | | | | | | | | | | | | |
| Número | Vencimento | Valor | Número | | | | | | | | | | |
| 001 | 19/10/2022 | 242,90 | | | | | | | | | | | |
| Cálculo do imposto | | | | | | | | | | | | | |
| Base de cálculo do ICMS 0,00 | Valor do ICMS 0,00 | Base de cálculo do ICMS Subst. 0,00 | Valor do ICMS Subst. 0,00 | | | | | | | | | | |
| Valor do frete 28,90 | Valor do seguro 0,00 | Desconto 0,00 | Valor do FCP ST 0,00 | | | | | | | | | | |
| Outras despesas acessórias 0,00 | | Valor total dos produtos 214,00 | | | | | | | | | | | |
| Valor do IPI 0,00 | | Valor total da nota 242,90 | | | | | | | | | | | |
| Transportador/Volumes transportados | | | | | | | | | | | | | |
| Nome melhor envios | Frete por conta 0 - Contratação do Frete por conta do Remetente (CIF) | Código ANTT | Placa do veículo | | | | | | | | | | |
| Endereço | Município | UF | Inscrição Estadual | | | | | | | | | | |
| Quantidade 1 | Espécie Volumes | Marca | Numeração | | | | | | | | | | |
| Peso bruto 3,000 | | Peso líquido 0,000 | | | | | | | | | | | |
| Itens da nota fiscal | | | | | | | | | | | | | |
| Código | Descrição do produto/serviço | NCM/SH | CSOSN | CFOP | UN | Qtd | Preço un | Preço total | BC ICMS | Vir.ICMS | Vir.IPI | %ICMS | %IPI |
| U38RXL89X-20cm-x-20cm | Chapa de Alumínio lisa 1/4" (6,35mm) 20cm-x-20cm | 76061290 | 0102 | 5.102 | Un | 1,00 | 76,00 | 76,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,0000 | 0,00 |
| ASNE9JVUK-30cm-x-40cm | chapa de alumínio lisa 4,00mm 30cm-x-40cm | 76061290 | 0102 | 5.102 | Un | 1,00 | 138,00 | 138,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,0000 | 0,00 |
| Cálculo do ISSQN | | | | Base de cálculo do ISSQN | | Valor do ISSQN | | Valor total dos serviços | | Valor do ISSQN | | | |
| Inscrição Municipal | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | | |
| Dados adicionais | | | | Reservado ao fisco | | Observações | | Total aproximado de tributos: R\$ 78,05 (32,13%) Federais R\$ 34,32 (14,13%) Estaduais R\$ 43,73 (18,00%) . Fonte IBPT. | | | | | |
| 18/10/2022 15:37:54 | | | | | | | | | | | | | |

Fonte: Autores (2024).

Figura 37 - Chapa de alumínio da estrutura secundária.

| | | | |
|--|--|--|------------------------------|
| RECEBEMOS DE Alure Comercio de Metais Eireli OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO | | NF-e Nº 028041 Série 1 | |
| Data de recebimento | Identificação e assinatura do recebedor | | |
|  | | DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica 0-Entrada 1-Saída 1 Nº 028041 SERIE: 1 Página: 1 de 1 | |
| Controle do Fisco  | | Chave de acesso 3523 0136 4297 2400 0100 5500 1000 0280 4116 2970 7808 | |
| Natureza da operação Venda de mercadoria a não contribuinte | | Protocolo de autorização de uso 135230153182206 30/01/2023 15:31:15 | |
| Inscrição Estadual 128583206115 | Inscr.est. do subst.trib. | CNPJ 36.429.724/0001-00 | |
| Destinatário/Remetente | | | |
| Nome / Razão Social Elieser Gabriel Silva Correa Siqueira | CNPJ/CPF | Inscrição Estadual | Data emissão 30/01/2023 |
| Endereço | Bairro | CEP | Data saída 30/01/2023 |
| Município São José dos Campos | Fone/Fax | UF SP | Hora saída 15:31:15 |
| Faturas | | | |
| Número | Vencimento | Valor | Número |
| 001 | 31/01/2023 | 67,20 | |
| Cálculo do imposto | | | |
| Base de cálculo do ICMS 0,00 | Valor do ICMS 0,00 | Base de cálculo do ICMS Subst. 0,00 | Valor do ICMS Subst. 0,00 |
| Valor do FCP ST 0,00 | Valor total dos produtos 43,00 | Valor do frete 24,20 | Valor do seguro 0,00 |
| Desconto 0,00 | Outras despesas acessórias 0,00 | Valor do IPI 0,00 | Valor total da nota 67,20 |
| Transportador/Volumes transportados | | | |
| Nome melhor envios | Frete por conta 0 - Contratação do Frete por conta do Remetente (CIF) | Código ANTT | Placa do veículo |
| Endereço | Município | UF | Inscrição Estadual |
| Quantidade 1 | Espécie Volumes | Marca | Numeração |
| | | | Peso bruto 2,000 |
| | | | Peso líquido 0,000 |
| Itens da nota fiscal | | | |
| Código | Descrição do produto/serviço | NCM/SH | CSOSN |
| U38RXL89X-10cm-x-20cm | Chapa de Alumínio lisa 1/4" (6,35mm) 10cm-x-20cm | 76061290 | 0102 |
| | | | 5.102 |
| | | | Un |
| | | | 1,00 |
| | | | 43,00 |
| | | | 43,00 |
| | | | 0,00 |
| | | | 0,00 |
| | | | 0,00 |
| | | | 0,0000 |
| | | | 0,00 |
| Cálculo do ISSQN | | | |
| Inscrição Municipal | Valor total dos serviços | Base de cálculo do ISSQN | Valor do ISSQN |
| | | 0,00 | 0,00 |
| Dados adicionais | | | |
| Observações | | Reservado ao fisco | |
| Total aproximado de tributos: R\$ 21,59 (32,13%) Federais R\$ 9,50 (14,13%) Estaduais R\$ 12,10 (18,00%) . Fonte IBPT. | | | |
| 30/01/2023 15:31:17 | | | |

Fonte: Autores (2024).

A.3 Porcas tipo Borboleta - Fornecedor Lutec

Figura 38 - Porcas tipo borboleta.

| RECEBEMOS DE LUTEC ELEMENTOS DE FIXAÇÃO E FERRAMENTAS LTDA ME OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO | | NF-e | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---------------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------|-------------|---------------|------------|-----------|----------------|---------------|
| DATA DE RECEBIMENTO | IDENTIFICAÇÃO E ASSINATURA DO RECEBEDOR | Nº 000.039.109 SÉRIE 002 | | | | | | | | | | | |
|  LUTEC ELEMENTOS DE FIXAÇÃO E FERRAMENTAS Avenida Analice Sakatauskas, 1235, Nao consta - Bela Vista, Osasco, SP - CEP: 06060013 Fone: 001136922824 | | DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica 0: Entrada <input type="checkbox"/> 1 1: Saída <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | | | | | | | |
| | |  | | | | | | | | | | | |
| | | CHAVE DE ACESSO 3523 0704 0851 8200 0100 5500 2000 0391 0913 0234 7140 | | | | | | | | | | | |
| | | Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora | | | | | | | | | | | |
| NATUREZA DA OPERAÇÃO Venda de mercadoria para consumidor final | | PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO 135231165006 20/07/2023 11:16:00 | | | | | | | | | | | |
| INSCRIÇÃO ESTADUAL 492428682115 | INSC. ESTADUAL DO SUBST. TRIBUTÁRIO | CNPJ 04.085.182/0001-00 | | | | | | | | | | | |
| DESTINATÁRIO / REMETENTE | | | | | | | | | | | | | |
| NOME/RAZÃO SOCIAL Elieser Gabriel Silva Correa Siqueira | | C.N.P.J / C.P.F. | DATA DA EMISSÃO 20/07/2023 | | | | | | | | | | |
| ENDEREÇO | | BAIRRO/DISTRITO | CEP | | | | | | | | | | |
| | | | DATA DA ENTRADA / SAÍDA 20/07/2023 | | | | | | | | | | |
| MUNICÍPIO Sao Jose dos Campos | FONE/FAX 0000000000 | UF SP | INSCRIÇÃO ESTADUAL | | | | | | | | | | |
| | | | HORA DE SAÍDA 11:15:58 | | | | | | | | | | |
| FATURA/DUPLICATA | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| CÁLCULO DO IMPOSTO | | | | | | | | | | | | | |
| BASE DE CÁLCULO DO ICMS | VALOR DO ICMS | BASE DE CÁLCULO DO ICMS SUBSTITUIÇÃO | VALOR DO ICMS SUBSTITUIÇÃO | VALOR TOTAL DOS PRODUTOS | | | | | | | | | |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 47,90 | | | | | | | | | |
| VALOR DO FRETE | VALOR DO SEGURO | DESCONTO | OUTRAS DESPESAS ACESSÓRIAS | VALOR DO IPI | | | | | | | | | |
| 11,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | | | | |
| | | | | VALOR TOTAL DA NOTA 59,40 | | | | | | | | | |
| TRANSPORTADOR/VOLUME | | | | | | | | | | | | | |
| RAZÃO SOCIAL Ebazar.com.br LTDA. | | FRETE POR CONTA 2 - Terceiros | CODIGO ANTT | PLACA DO VEÍCULO | | | | | | | | | |
| ENDEREÇO Av. das Nacoes Unidas 3003 | | MUNICÍPIO Osasco | UF SP | CNPJ/CPF 03.007.331/0001-41 | | | | | | | | | |
| QUANTIDADE | ESPÉCIE | MARCA | NUMERAÇÃO | PESO BRUTO | | | | | | | | | |
| | | | | 0,140 | | | | | | | | | |
| | | | | PESO LÍQUIDO 0,140 | | | | | | | | | |
| DADOS DO PRODUTO / SERVIÇOS | | | | | | | | | | | | | |
| CODIGO PRODUTO | DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS / SERVIÇOS | NCM/SH | CSOSN | CFOP | UNID. | QTD. | VLR UNIT. | VALOR TOTAL | B. CALC. ICMS | VALOR ICMS | VALOR IPI | ALÍQUOTAS ICMS | ALÍQUOTAS IPI |
| POB05A2 | POR. BORBOLETA M5-0,80MA INOX A2 | 73181600 | 2102 | 5102 | UN | 20 | 2,395 | 47,90 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Fonte: Autores (2024).

A.4 Réguas de Aço - Fornecedor S Prochownik Comercial

Figura 39 - Régua de aço de 1 metro.

| | | | |
|--|--|---|------------------------------------|
| RECEBEMOS DE S PROCHOWNIK COMERCIAL LTDA OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO | | NF-e | |
| DATA DE RECEBIMENTO | IDENTIFICAÇÃO E ASSINATURA DO RECEBEDOR | Nº 000.136.337 SÉRIE 003 | |
|  S PROCHOWNIK COMERCIAL LTDA Rua Campos Vergueiro, 140 - Vila Anastacio, Sao Paulo, SP - CEP: 05095020 Fone: 001139515309 | | DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica 0: Entrada 1: Saída 1 Nº 000.136.337 SÉRIE:003 Folha 1 d 1 | |
| | |  CHAVE DE ACESSO 3522 1168 1468 1000 0194 5500 3000 1363 3710 3817 6857 Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora | |
| NATUREZA DA OPERAÇÃO Venda de mercadorias | | PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO 135221509764 03/11/2022 10:08:31 | |
| INSCRIÇÃO ESTADUAL 113426990112 | INSC. ESTADUAL DO SUBST. TRIBUTÁRIO | CNPJ 68.146.810/0001-94 | |
| DESTINATÁRIO / REMETENTE | | C.N.P.J / C.P.F. | |
| NOME/RAZÃO SOCIAL Elieser Siqueira | | DATA DA EMISSÃO 03/11/2022 | |
| ENDEREÇO | | BAIRRO/DISTRITO | CEP |
| | | DATA DA ENTRADA / SAÍDA 03/11/2022 | |
| MUNICÍPIO Sao Jose dos Campos | FONE/FAX | UF SP | INSCRIÇÃO ESTADUAL |
| | | HORA DE SAÍDA 10:08:28 | |
| FATURA/DUPLICATA | | | |
| | | | |
| CÁLCULO DO IMPOSTO | | | |
| BASE DE CÁLCULO DO ICMS 27,50 | VALOR DO ICMS 4,95 | BASE DE CÁLCULO DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00 | VALOR DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00 |
| VALOR TOTAL DOS PRODUTOS 27,50 | | | |
| VALOR DO FRETE 0,00 | VALOR DO SEGURO 0,00 | DESCONTO 0,00 | OUTRAS DESPESAS ACESSÓRIAS 0,00 |
| VALOR DO IPI 0,00 | | VALOR TOTAL DA NOTA 27,50 | |
| TRANSPORTADOR/VOLUME | | | |
| RAZÃO SOCIAL EBAZAR.COM.BR LTDA | | FRETE POR CONTA 2 - Terceiros | CODIGO ANTT |
| ENDEREÇO AVENIDA DAS NACOES UNIDAS 3000 3003 | | FLACA DO VEÍCULO | UF SP |
| MUNICÍPIO OSASCO | | CNPJ/CPF 03.007.331/0122-39 | |
| QUANTIDADE | ESPÉCIE | MARCA | INSCRIÇÃO ESTADUAL 120519234116 |
| | | NUMERAÇÃO | PESO BRUTO |
| | | | PESO LÍQUIDO |
| DADOS DO PRODUTO / SERVIÇOS | | | |
| CODIGO PRODUTO | DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS / SERVIÇOS | NCM/SH | CST |
| 7908433998617 | Régua De Metal - Aço Inox - 1 Metro - Patchwork - Nybc | 90178010 | 100 |
| | | CFOP | UNID. |
| | | 5106 | UN |
| | | QTD. | VLR UNIT. |
| | | 1 | 27,50 |
| | | VALOR TOTAL | B. CALC. ICMS |
| | | 27,50 | 27,50 |
| | | VALOR ICMS | VALOR IPI |
| | | 4,95 | 0,00 |
| | | ALÍQUOTAS ICMS | ALÍQUOTAS IPI |
| | | 18,00 | 0,00 |

Fonte: Autores (2024).

Figura 40 - Régua de aço de 0,60 metro.

| RECEBEMOS DE S PROCHOWNIK COMERCIAL LTDA OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO | | NF-e | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|--|--|-------|------|-----------|-------------|---------------|------------|-----------|----------------|------|
| DATA DE RECEBIMENTO | IDENTIFICACAO E ASSINATURA DO RECEBEDOR | Nº 000.190.145 SÉRIE 003 | | | | | | | | | | | |
|  S PROCHOWNIK COMERCIAL LTDA Rua Campos Vergueiro, 140 - Vila Anastacio, Sao Paulo, SP - CEP: 05095020 Fone: 001139515309 | DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica 0: Entrada 1: Saída 1 | |  | | | | | | | | | | |
| | Nº 000.190.145 SÉRIE:003 Folha 1 d 1 | | | CHAVE DE ACESSO 3523 0168 1468 1000 0194 5500 3000 1901 4518 4593 2326 Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora | | | | | | | | | |
| NATUREZA DA OPERAÇÃO Venda de mercadorias | | PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO 135230139575 27/01/2023 10:03:22 | | | | | | | | | | | |
| INSCRIÇÃO ESTADUAL 113426990112 | INSC. ESTADUAL DO SUBST. TRIBUTÁRIO | CNPJ 68.146.810/0001-94 | | | | | | | | | | | |
| DESTINATÁRIO / REMETENTE | | | | | | | | | | | | | |
| NOME/RAZÃO SOCIAL Elieser Siqueira | | C.N.P.J / C.P.F. | DATA DA EMISSÃO 27/01/2023 | | | | | | | | | | |
| ENDEREÇO | | BAIRRO/DISTRITO | CEP | | | | | | | | | | |
| MUNICÍPIO Sao Jose dos Campos | | FONE/FAX | UF SP | | | | | | | | | | |
| | | INSCRIÇÃO ESTADUAL | HORA DE SAÍDA 10:03:19 | | | | | | | | | | |
| FATURA/DUPLICATA | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| CÁLCULO DO IMPOSTO | | | | | | | | | | | | | |
| BASE DE CÁLCULO DO ICMS 28,90 | VALOR DO ICMS 5,20 | BASE DE CÁLCULO DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00 | VALOR DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00 | | | | | | | | | | |
| VALOR DO FRETE 0,00 | VALOR DO SEGURO 0,00 | DESCONTO 0,00 | OUTRAS DESPESAS ACESSÓRIAS 0,00 | | | | | | | | | | |
| VALOR DO IPI 0,00 | | | VALOR TOTAL DA NOTA 28,90 | | | | | | | | | | |
| TRANSPORTADOR/VOLUME | | | | | | | | | | | | | |
| RAZÃO SOCIAL EBAZAR.COM.BR LTDA | | FRETE POR CONTA 2 - Terceiros | CODIGO ANTT | | | | | | | | | | |
| ENDEREÇO AVENIDA DAS NACOES UNIDAS 3000 3003 | | MUNICÍPIO OSASCO | PLACA DO VEÍCULO | | | | | | | | | | |
| QUANTIDADE | ESPECIE | MARCA | UF SP | | | | | | | | | | |
| | | NUMERAÇÃO | CNPJ/CPF 03.007.331/0122-39 | | | | | | | | | | |
| | | PESO BRUTO 0,120 | INSCRIÇÃO ESTADUAL 120519234116 | | | | | | | | | | |
| | | | PESO LÍQUIDO 0,120 | | | | | | | | | | |
| DADOS DO PRODUTO / SERVIÇOS | | | | | | | | | | | | | |
| CODIGO PRODUTO | DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS / SERVIÇOS | NCM/SH | CST | CFOP | UNID. | QTD. | VLR UNIT. | VALOR TOTAL | B. CALC. ICMS | VALOR ICMS | VALOR IPI | ALÍQUOTAS ICMS | IPI |
| 7908433931638 | Régua De Metal - Aço Inox - 60 Cm - Patchwork - Nybc | 90178010 | 100 | 5106 | UN | 1 | 28,90 | 28,90 | 28,90 | 5,20 | 0,00 | 18,00 | 0,00 |

Fonte: Autores (2024).

A.5 Microcontrolador - Orçamento em Plataforma de Comércio Eletrônico

Figura 41 - Microcontrolador.

The image shows a screenshot of a Mercado Livre product page for an Arduino Pro Mini compatible board. The page features a yellow header with the Mercado Livre logo, a search bar, and navigation links. The main content area displays a blue PCB with a microcontroller, labeled 'Placa Compatível Com Arduino Pro Mini Atmega328p 16mhz 5v'. The product is priced at R\$ 34.99, with a 4.6-star rating from 27 reviews. The page also includes a 'Comprar' button and a 'Produtos do vendedor' section.

mercado livre 25 anos

Buscar produtos, marcas e muito mais...

Disney+ STAR+ INCLUIDOS Assine o meli+ por R\$ 17,99

Enviar para São José dos Campo... Categorias > Ofertas Histórico Supermercado Moda Mercado Play Vender Contato

Grátis

Crie a sua conta Entre Compras

Também pode te interessar: chip arduino uno - placa bluetooth 5v - teclado arduino - arduino - atmega328 - leitor rfid arduino - fonte arduino uno

Voltar à lista | Eletrônicos, Áudio e Vídeo > Componentes Eletrônicos > Placas de Microcontroladores > Arduino > Arduino Pro Mini

Vender um igual | Compartilhar

Novo | +100 vendidos

Placa Compatível Com Arduino Pro Mini Atmega328p 16mhz 5v

4.6 ★★★★★ (27)

R\$ 34⁹⁹

em 3x R\$ 11⁶⁶ sem juros

Ver os meios de pagamento

Chegará amanhã por R\$ 10⁹⁸ R\$ 12

Benefício Mercado Pontos

Mais formas de entrega

Retire a partir de quarta-feira em uma agência Mercado Livre por R\$ 10⁴³ R\$ 11⁴⁰

Benefício Mercado Pontos

Ver no mapa

Estoque disponível

Armazenado e enviado pelo **FULL**

Quantidade: 1 unidade (+20 disponív...)

Produtos do vendedor

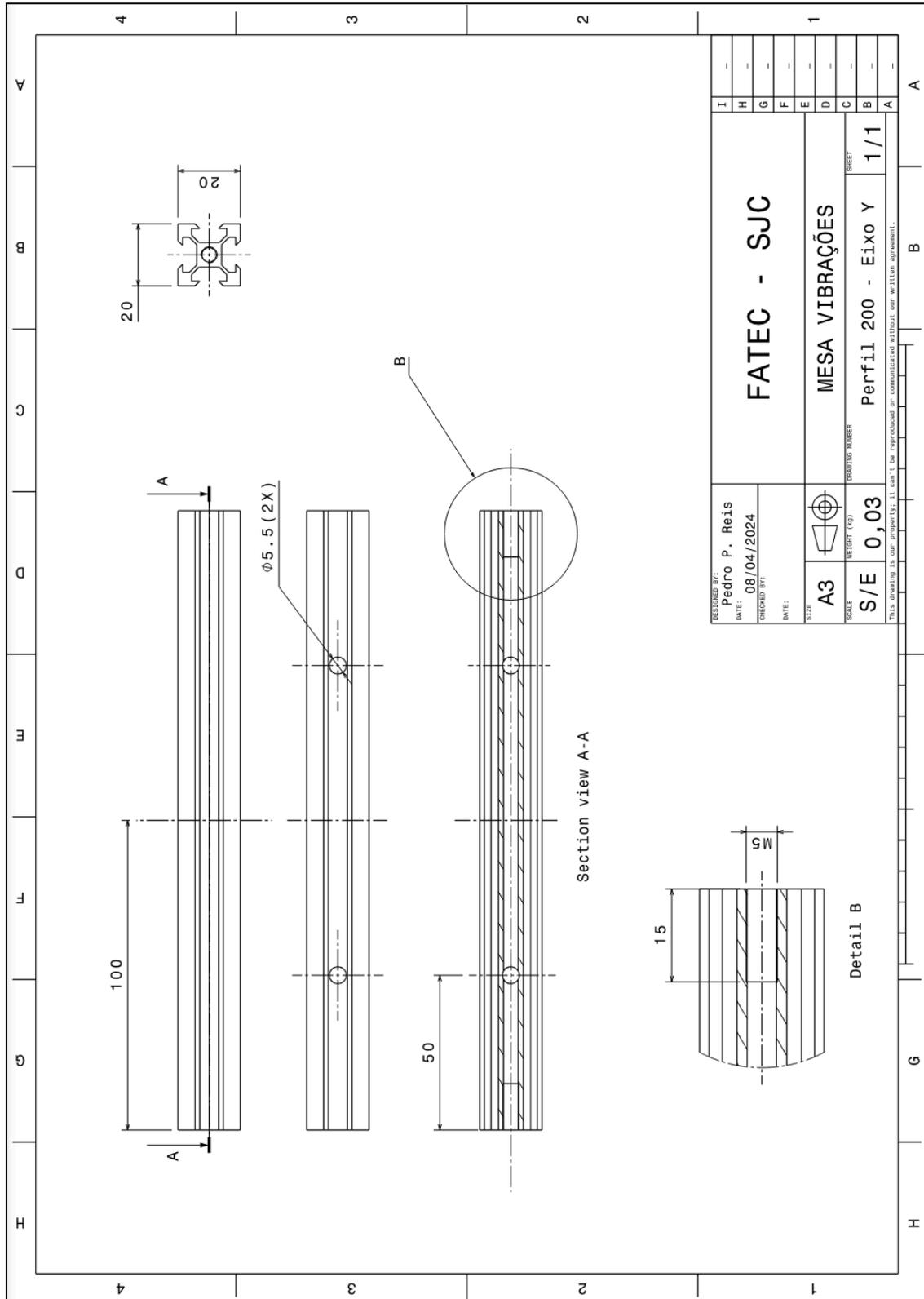
Comprar

Fonte: Autores (2024).

APÊNDICE B – DETALHAMENTO DE FABRICAÇÃO

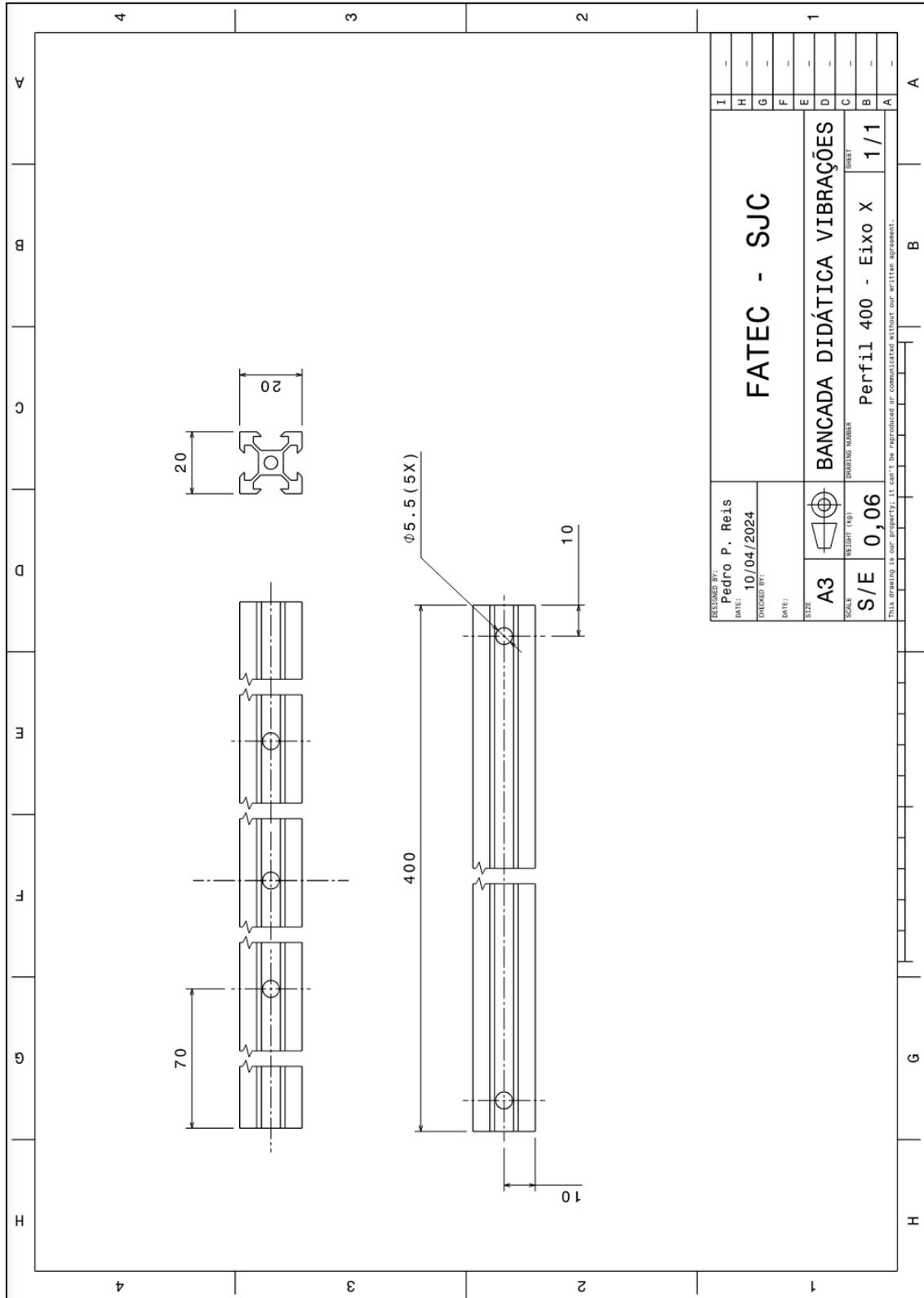
B.1 Detalhamento Estrutura Base

Figura 42 - Perfil 200 do frame de perfis .



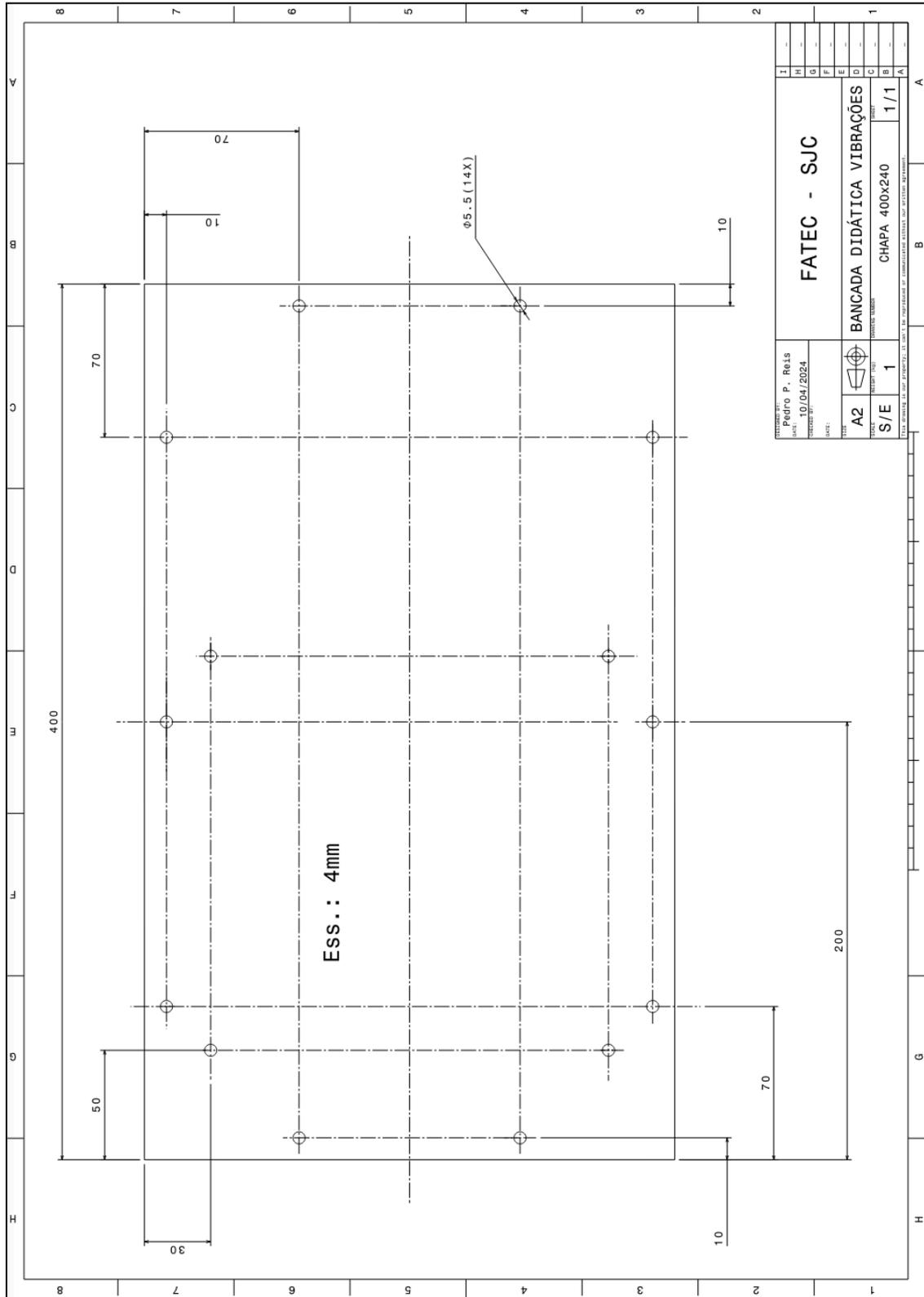
Fonte: Autores (2024).

Figura 43 - Perfil 400 do frame de perfis.



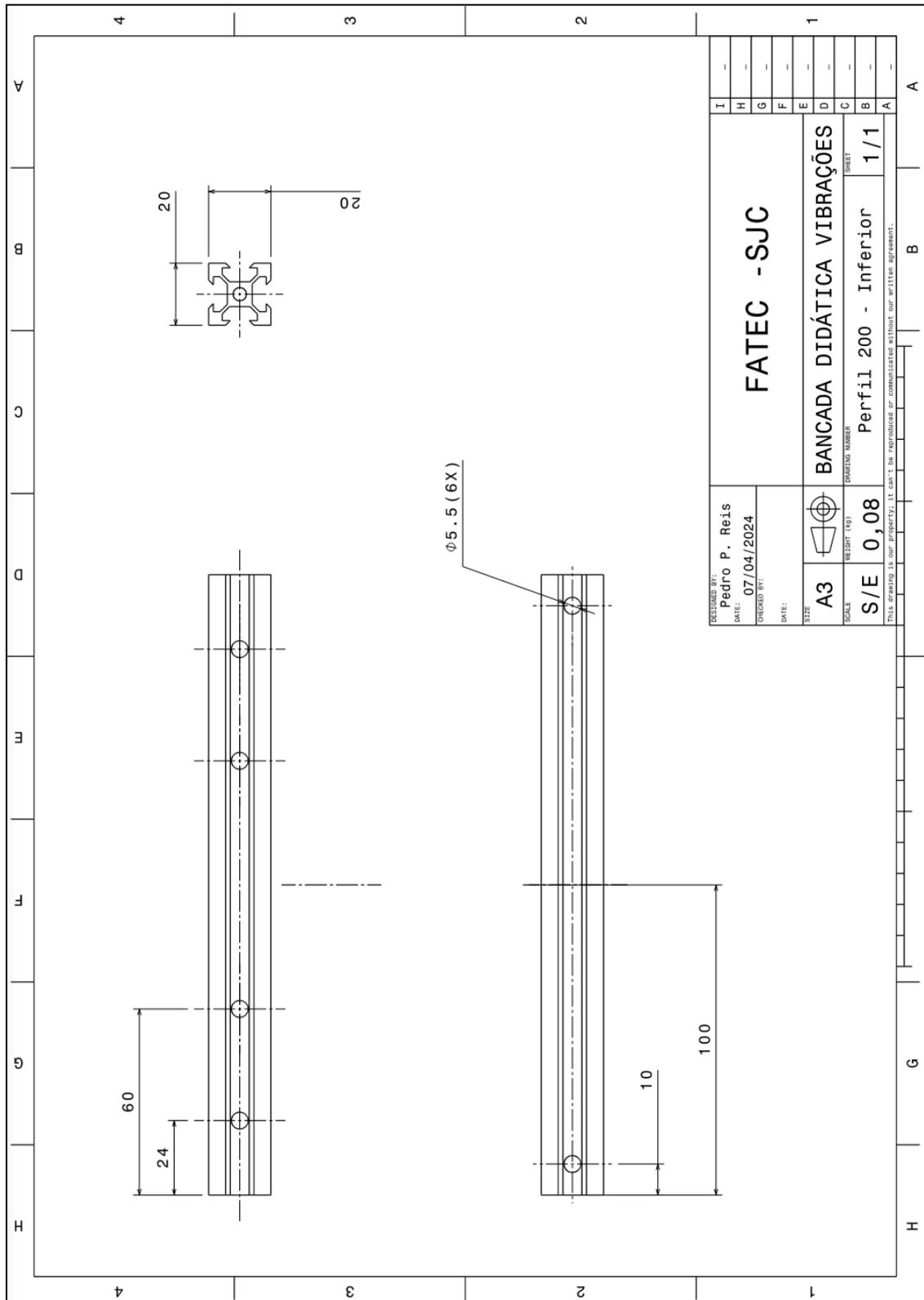
Fonte: Autores (2024).

Figura 44 - Chapa da estrutura base.



Fonte: Autores (2024).

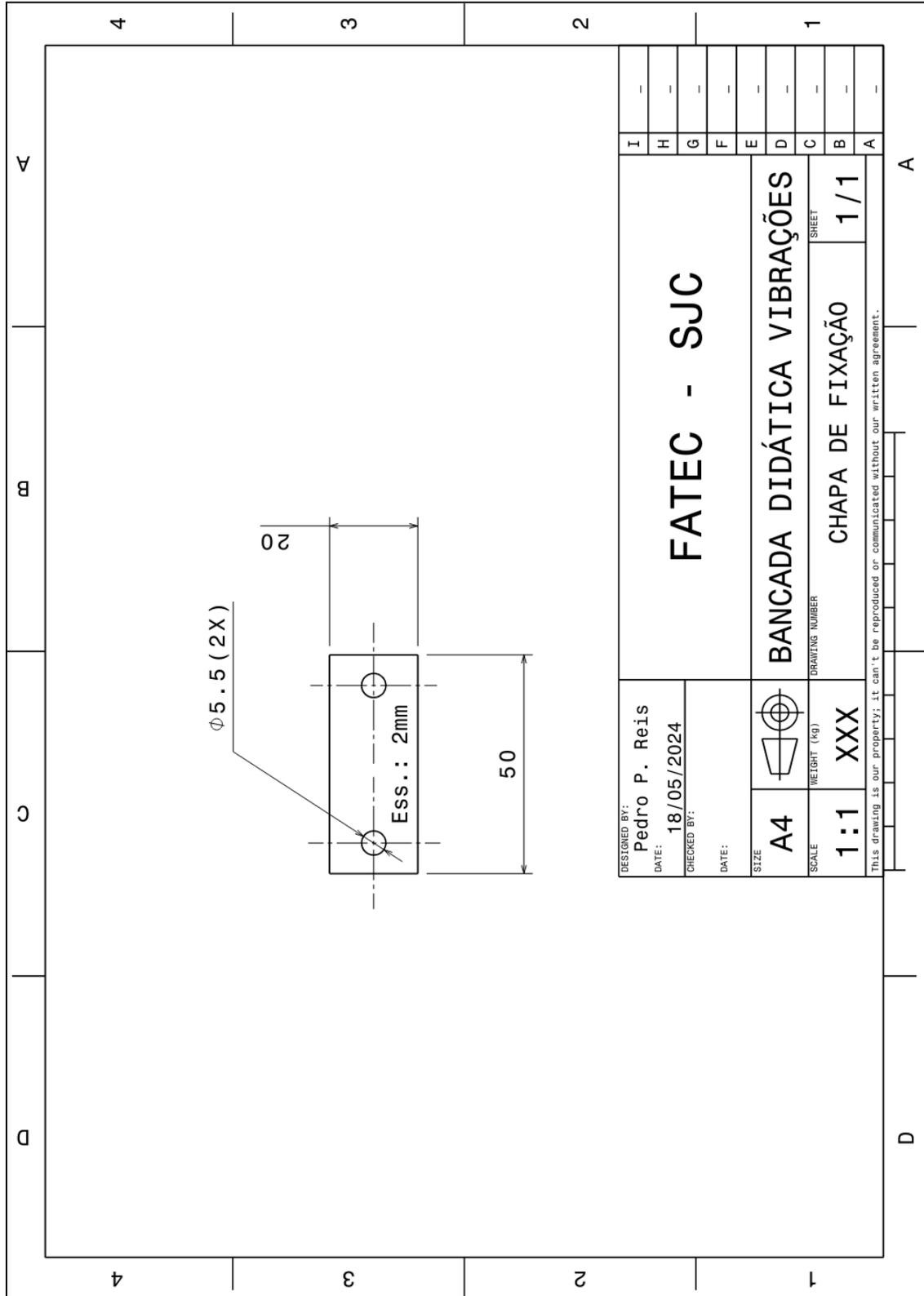
Figura 45 - Perfil 200 da estrutura base.



| | | | | | | | |
|---|---------------------|--------|-----------------|-----------|----------|--|-------------|
| DESIGNED BY: Pedro P. Reis | DATE: 07/04/2024 | A3 | WEIGHT (kg) | SCALE | S/E 0,08 | DRAWING NUMBER Perfil 200 - Inferior SHEET 1/1 | FATEC - SJC |
| CHECKED BY: | DATE: | | | | | | |
| This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement. | | | | | | | |

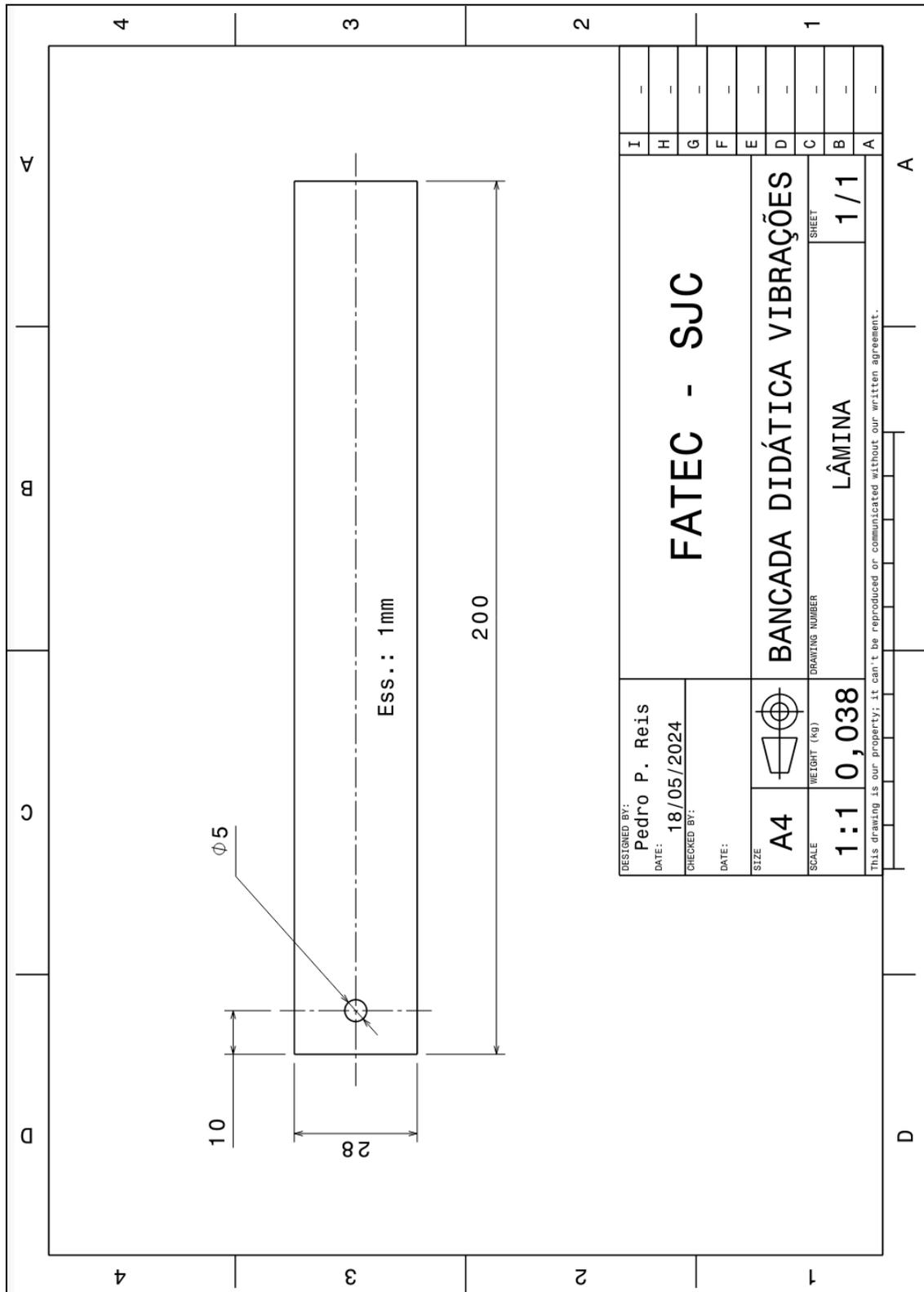
Fonte: Autores (2024).

Figura 46 - Chapa de fixação.



Fonte: Autores (2024).

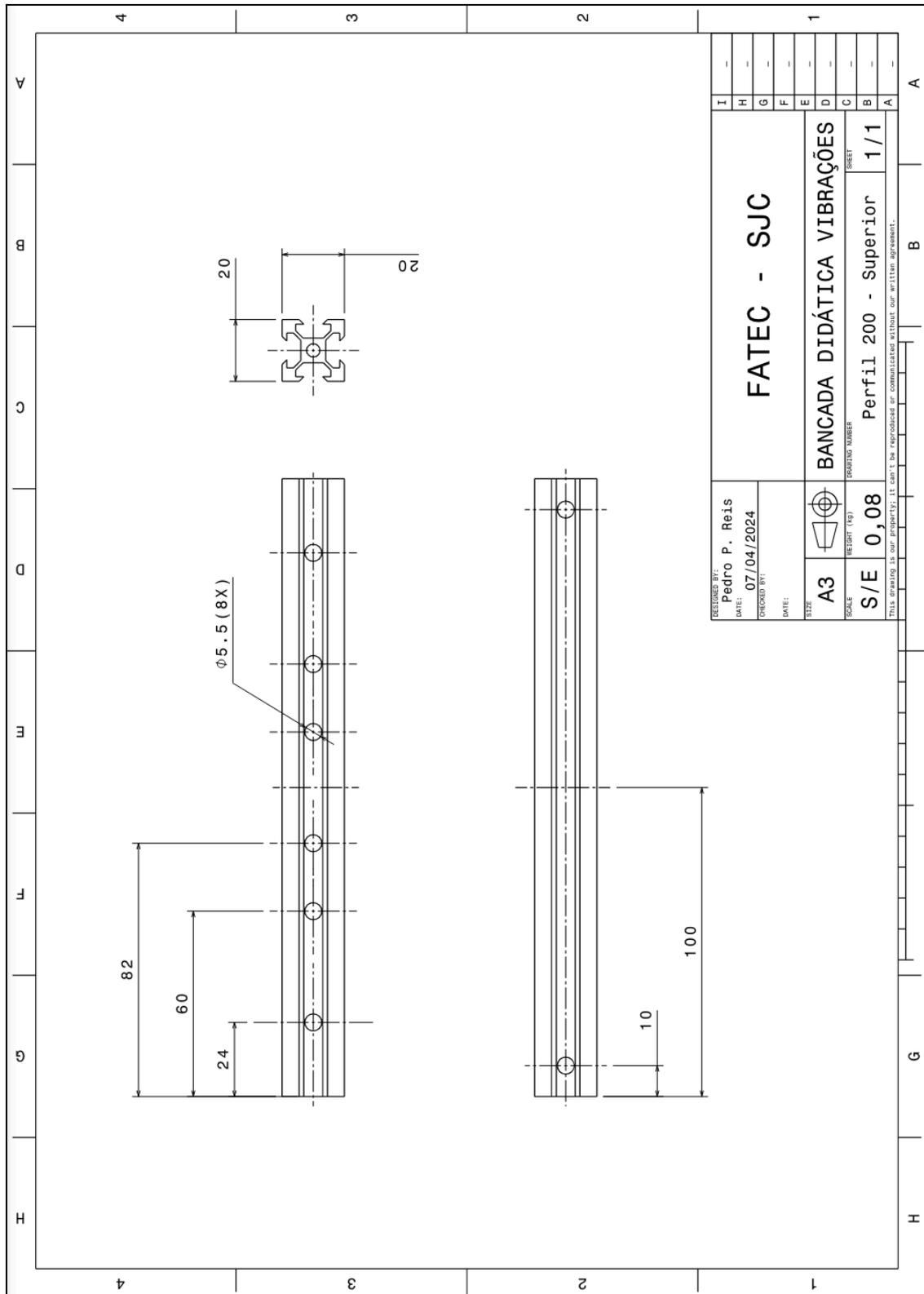
Figura 47 - Lâmina.



Fonte: Autores (2024).

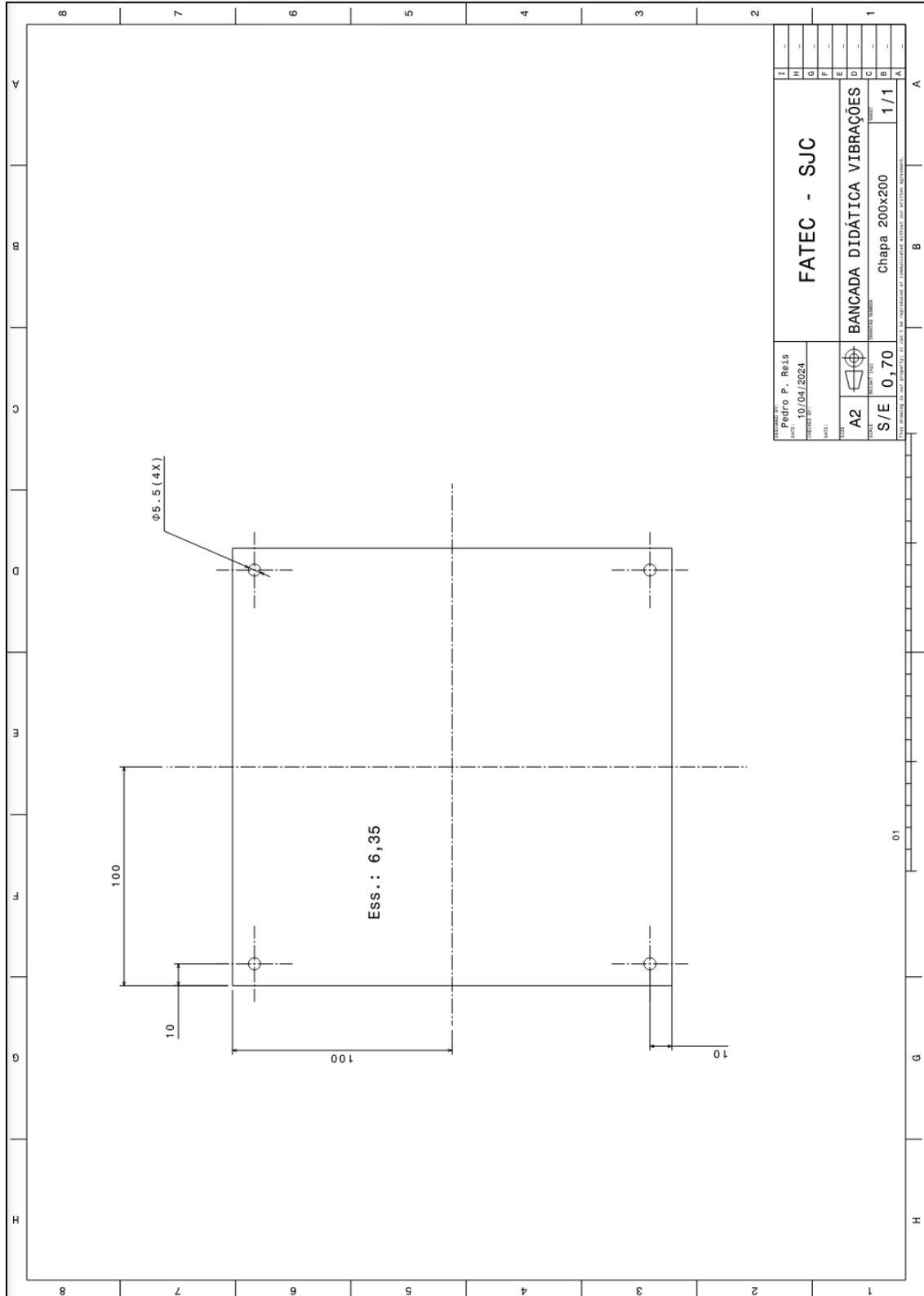
B.2 Detalhamento Estrutura Primária

Figura 48 - Perfil 200 da estrutura primária.



Fonte: Autores (2024).

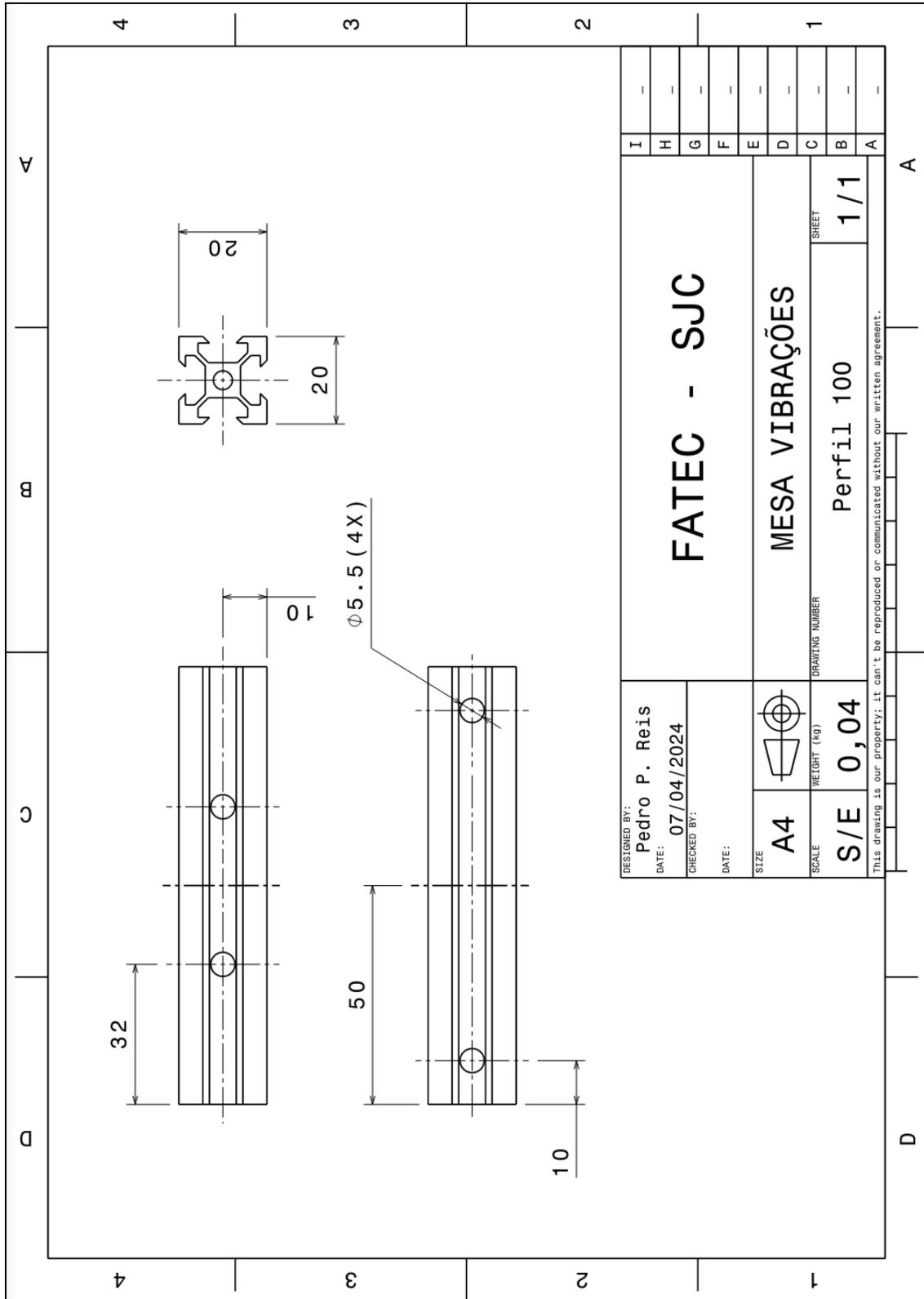
Figura 49 - Chapa da estrutura primária.



Fonte: Autores (2024).

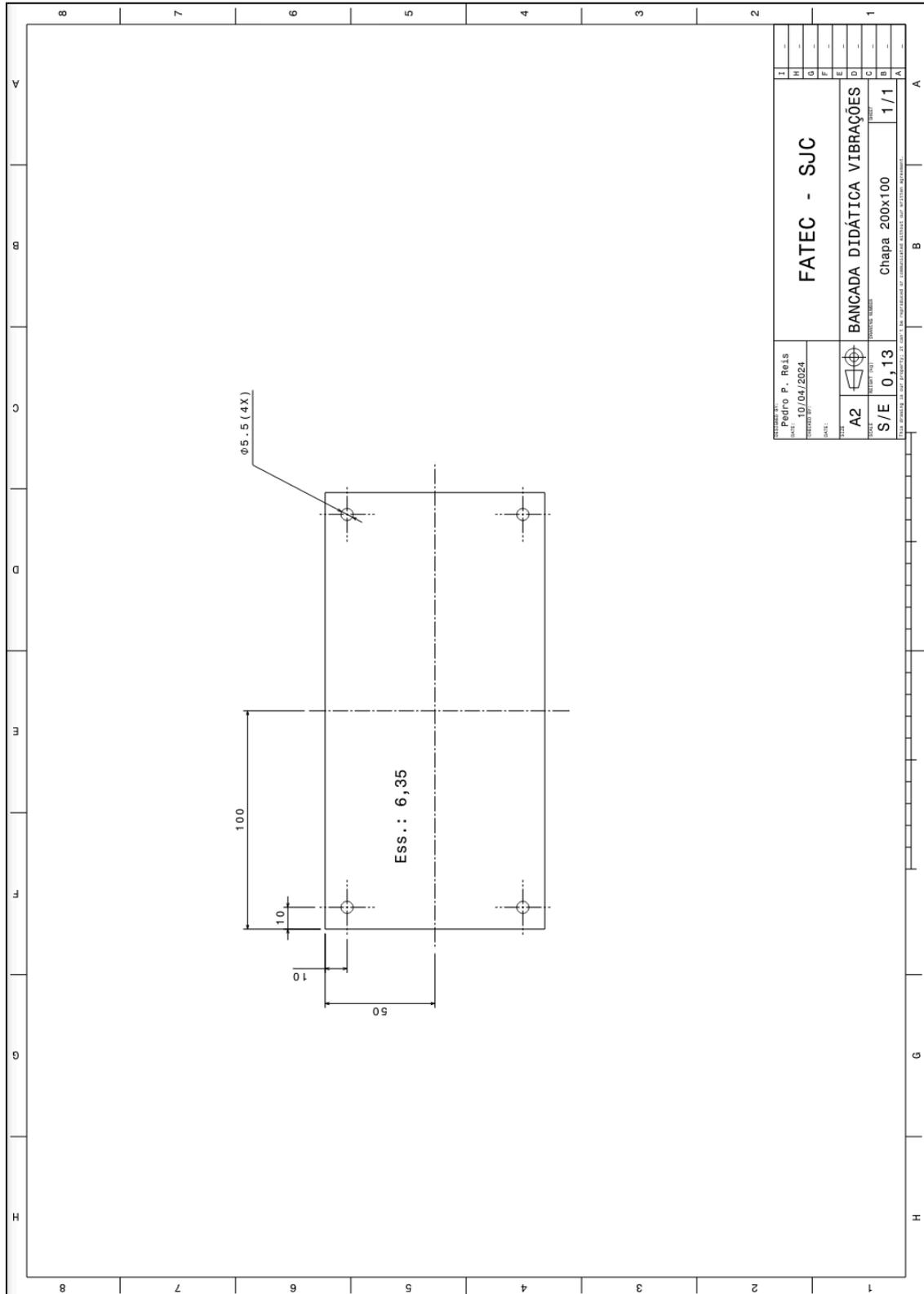
B.3 Detalhamento Estrutura Secundária

Figura 50 - Perfil 100 da estrutura secundária.



Fonte: Autores (2024).

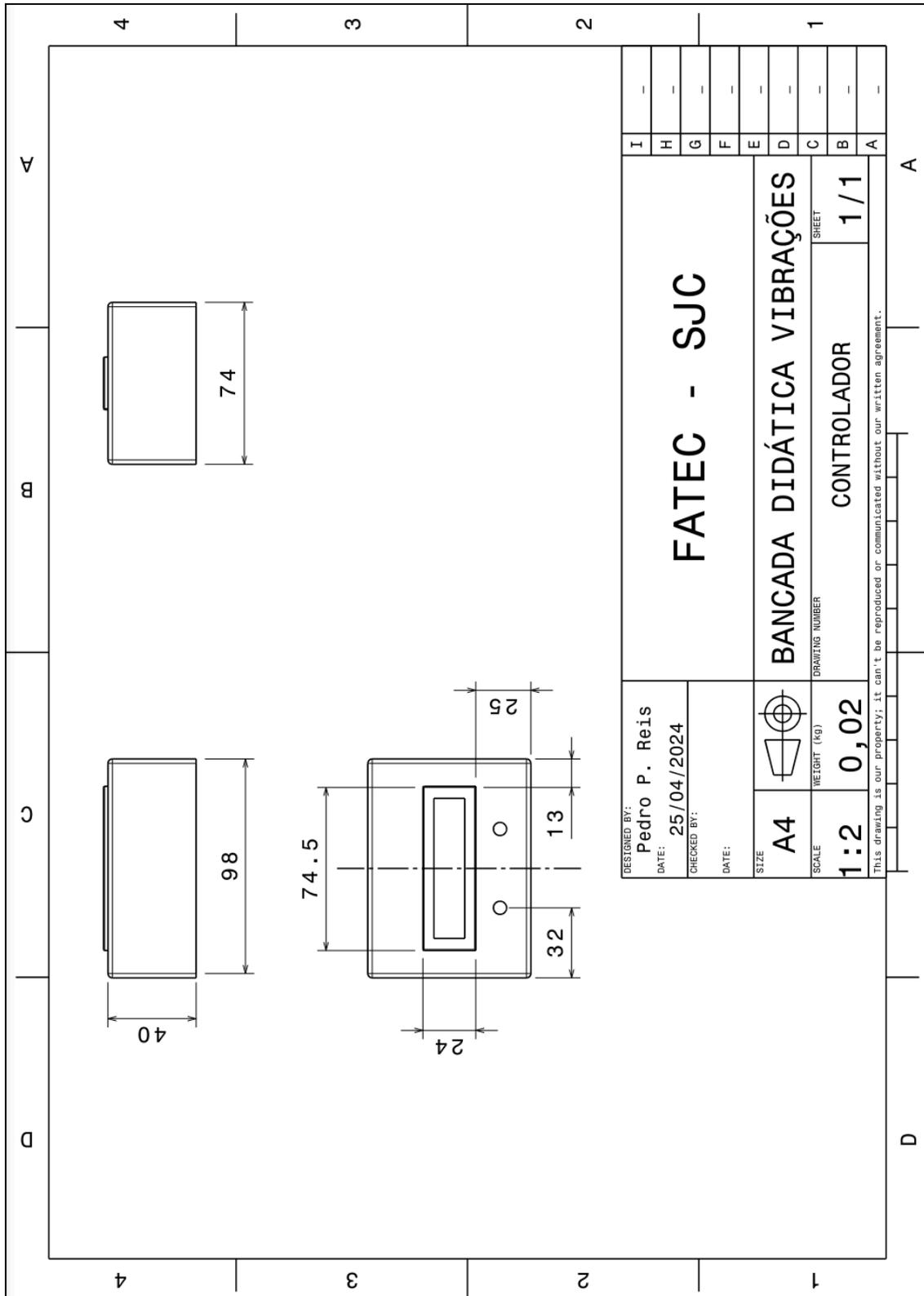
Figura 51 - Chapa da estrutura secundária.



Fonte: Autores (2024).

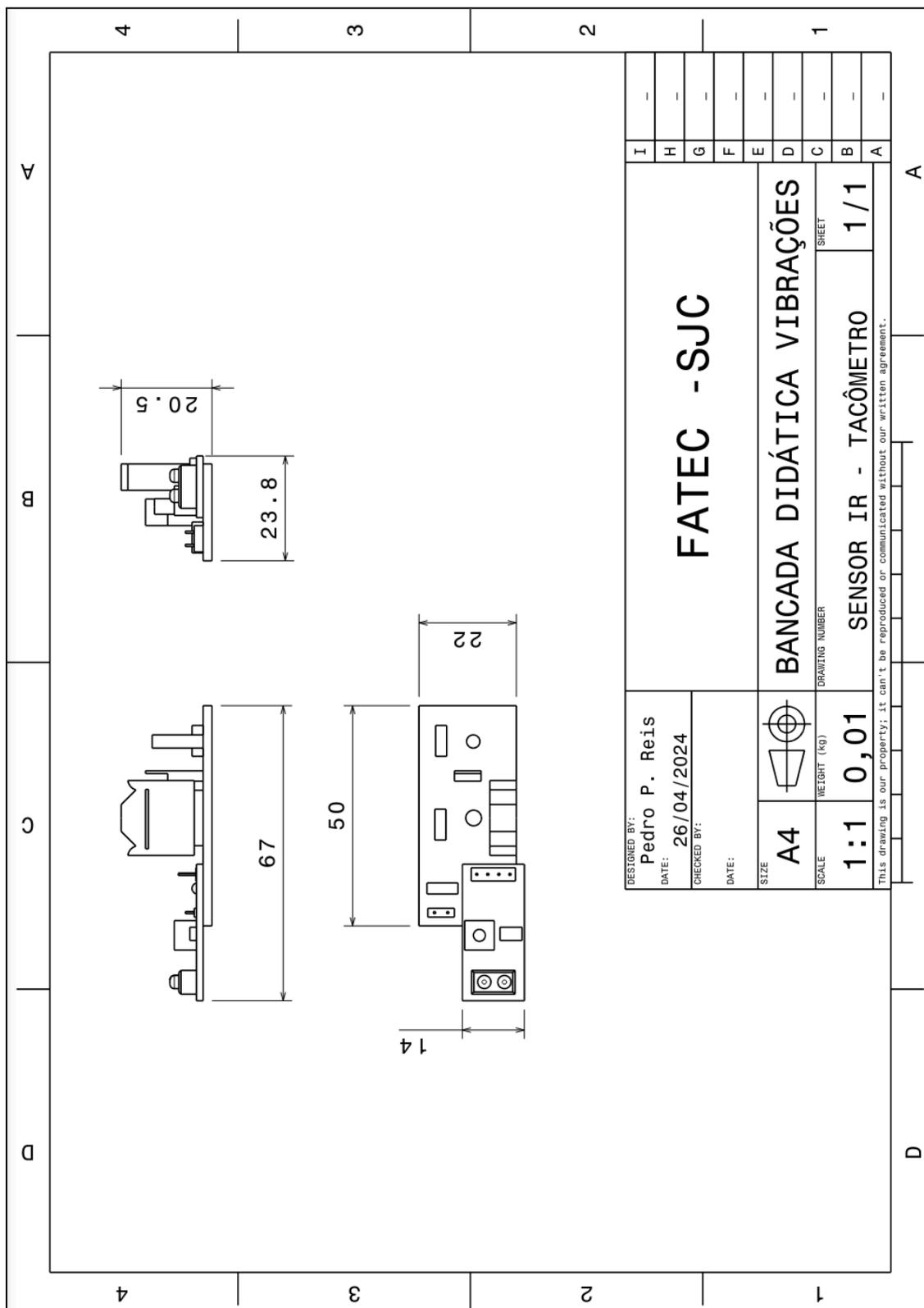
B.4 Detalhamento Interface Eletrônica

Figura 52 - Central de controle.



Fonte: Autores (2024).

Figura 53 - Placas de acionamento de potência e IR-Tacômetro.

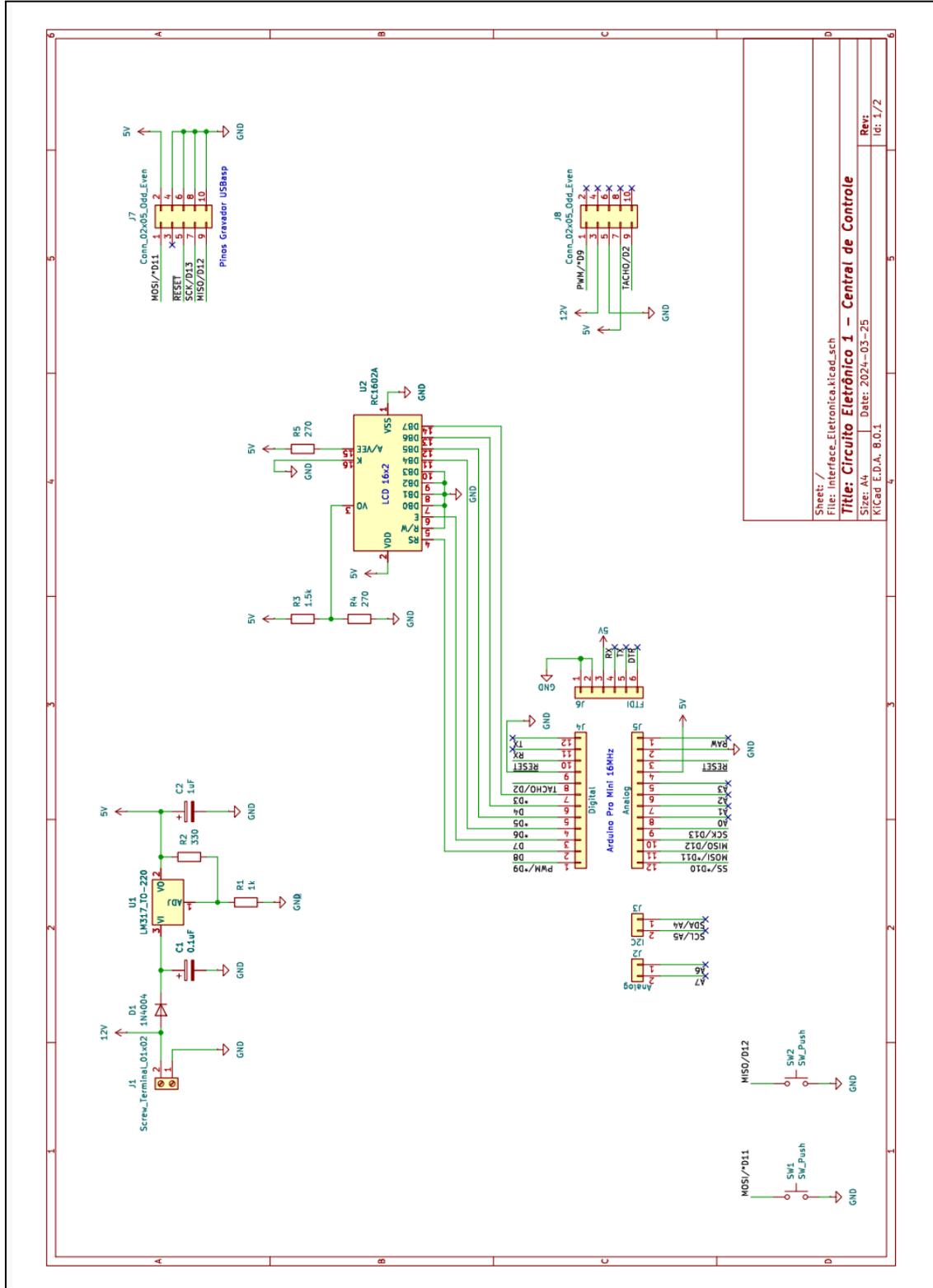


Fonte: Autores (2024).

APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO DA INTERFACE ELETRÔNICA

C.1 Central de Controle

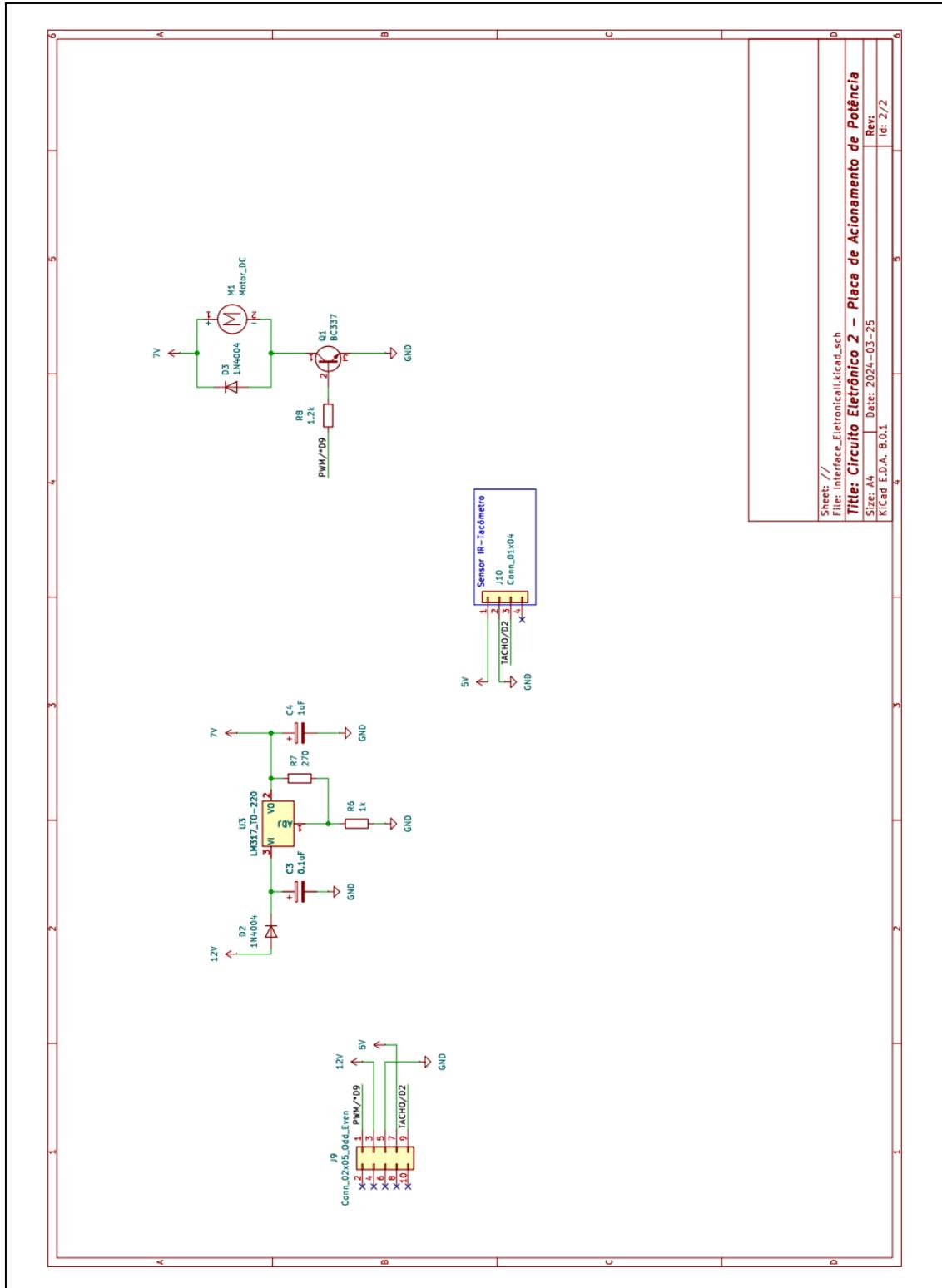
Figura 54 - Central de controle.



Fonte: Autores (2024).

C.2 Placa de Acionamento de Potência

Figura 55 - Placa de acionamento de potência.



Fonte: Autores (2024).

C.3 Código C++ da Central de Controle

Figura 56 - Código da central de controle parte 1.

```

/*****
/***** CÓDIGO C++ DA CENTRAL DE CONTROLE *****/
/*****

// include the library code
#include<LiquidCrystal.h>

// initialize the library by associating any needed LCD interface pin
// with the arduino pin number it is connected to
const int rs = 8, en = 7, d4 = 6, d5 = 5, d6 = 4, d7 = 3;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);

//--- Global variables ---
char f_button11, // Decrement button flag
      f_button12; // Increment button flag

char message1[16] = "Motor PWR: XXX %"; // String in up row
char message2[16] = "Tacho: XXXXX rpm"; // String in down row
char pwm_value = 50; // Pwm value starts at
50%
unsigned long count_value = 0, // Count value variable
              rpm_value = 0, // Rpm value variable
              time_value = 0, // Time interval
              oldtime_value = 0; // Time tag start

//--- Auxiliary Functions Prototype ---
void buttons_logic(); // Buttons logic function
void control_logic(); // Control logic function
void display_update(); // Display update function
void counter(); // Contador function

//--- Interruption Rotine ---
void counter(){
  count_value++; // Increments +1 in the
count value
} //end function

//--- Setup Function ---
void setup() {
  lcd.begin(16, 2); // Set up the LCD's
number of columns and rows
  lcd.print("hello world!"); // Print a message to the
LCD.
  delay(500); // Delay function 500ms
// Configure pins as an
input and enable the internal pull-up resistor
  pinMode(11, INPUT_PULLUP); // Decrement button
  pinMode(12, INPUT_PULLUP); // Increment button
  pinMode(9, OUTPUT); // Configure pin 9 as PWM

```

Fonte: Autores (2024).

Figura 57 - Código da central de controle parte 2.

```

output
pinMode(2, INPUT_PULLUP); // Configure pin 2 as
Tachometer input
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), counter, RISING); //Configure pin 2 as
interrupt input for counter function call
} //end function

//--- Infinite Loop Function ---
void loop() {
  buttons_logic(); // Buttons Logic Function
  control_logic(); // Control Logic Function
  display_update(); // Display update Function
  delay(100); // Delay Function 100ms
} //end function

//--- Auxiliary Functions Development ---
void buttons_logic() {
  if(!digitalRead(11)) f_button11 = 1; // If decrement button
  pressed, flag decrement button high state
  if(!digitalRead(12)) f_button12 = 1; // If increment button
  pressed, flag increment button high state

  if(digitalRead(11) && f_button11) { // If decrement button
  released and flag decrement button high,
  f_button11 = 0; // Clear flag variable
  pwm_value -= 1; // Decrement -2 in pwm
  value
  } //end if

  if(digitalRead(12) && f_button12) { // If increment button
  released and flag increment button high,
  f_button12 = 0; // Clear flag variable
  pwm_value += 1; // Increment +2 in pwm
  value
  } //end if

  if(pwm_value <= 10) pwm_value = 10; // Pwm value down limit
  if(pwm_value >= 90) pwm_value = 90; // Pwm value up limit
  analogWrite(9, map(pwm_value, 0, 100, 0, 255)); // Update pwm value at
  output
} //end function

void control_logic() {
  time_value = millis() - oldtime_value; // Updates time interval
  if(time_value >= 1000) { // If interval time is
  greater than 2 seconds,
  detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2)); // Stops interrupt input
  rpm_value = count_value*60; // Calculates rpm value
  oldtime_value = millis(); // Updates raw time
}

```

Fonte: Autores (2024).

Figura 58 - Código da central de controle parte 3.

```

    count_value = 0; // Clear count value
    time_value = 0; // Clear time value
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), counter, RISING); // Starts interrupt
input again
} //end if
} //end function

void display_update() {
    message1[11] = (pwm_value%1000)/100 + 0x30; // Updates hundred digit
to string in up row
    message1[12] = (pwm_value%100)/10 + 0x30; // Updates ten digit to
string in up row
    message1[13] = (pwm_value%10)/1 + 0x30; // Updates unit digit to
string in up row

    message2[7] = (rpm_value%100000)/10000 + 0x30; // Updates tens of
thousands digit to string in down row
    message2[8] = (rpm_value%10000)/1000 + 0x30; // Updates thousands
digit to string in down row
    message2[9] = (rpm_value/1000)/100 + 0x30; // Updates hundred digit
to string in down row
    message2[10] = (rpm_value%100)/10 + 0x30; // Updates ten digit to
string in down row
    message2[11] = (rpm_value%10)/1 + 0x30; // Updates unit digit to
string in down row

    lcd.setCursor(0, 0); // Move the cursor with a
row and column position 0, 0
    lcd.print(message1); // Prints string in up row
    lcd.setCursor(0, 1); // Move the cursor with a
row and column position 0, 1
    lcd.print(message2); // Prints string in down
row
} //end function

```