



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



CARLOS EDUARDO LANNA MAYRINK

**PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE
ELEMENTOS DE MÁQUINAS: FREIO A DISCO, VOLANTE DE
INÉRCIA E TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA**

OURO PRETO - MG
2023

CARLOS EDUARDO LANNA MAYRINK
carlos.mayrink@aluno.ufop.edu.br

**PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE
ELEMENTOS DE MÁQUINAS: FREIO A DISCO, VOLANTE DE
INÉRCIA E TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: Diogo Antônio de Sousa

OURO PRETO – MG
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M474p Mayrink, Carlos Eduardo Lanna.

Projeto de uma bancada didática para estudo de elementos de máquinas [manuscrito]: freio a disco, volante de inércia e transmissão de potência. / Carlos Eduardo Lanna Mayrink. - 2025.

86 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa Sousa.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Máquinas - Elementos de máquina. 2. Freios. 3. Engenharia mecânica - Volante de inércia. 4. Engenheiros mecânicos - Projeto mecânico. 5. Energia - Transferência. I. Sousa, Diogo Antônio de Sousa. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carlos Eduardo Lanna Mayrink

Projeto de uma bancada didática para estudo de elementos de máquinas: freio a disco, volante de inércia e transmissão de potência

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em 03 de Abril de 2025

Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)

MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/05/2025



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2025, às 20:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0904270** e o código CRC **E86614A5**.

Mesmo que teus gentis olhos azuis não estejam mais aqui, eu sei que a senhora olha por mim em toda e qualquer jornada. Dedico este trabalho a minha avó: Alda

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente, a pessoa que tornou tudo isso possível: Minha mãe Elizabeth. Foi apenas com todo o infinito amor, carinho, preocupação, ajuda, suporte e sacrifícios, que cheguei até aqui. Devo tudo a senhora minha mãe, hoje e sempre.

Agradeço também ao meu pai, Domingos Sávio, por todo suporte e infinitas viagens entre Ponte Nova e Ouro Preto.

Faço também um agradecimento ao Diogo, que me orientou, ajudou e aconselhou durante todo o longo processo do TCC, obrigado pela paciência e por todo o suporte.

Sou infinitamente grato à UFOP e a GLORIOSA ESCOLA DE MINAS, por todos estes anos magníficos, e aos professores da Engenharia Mecânica, por todo conhecimento e aprendizado que me tornaram hoje, um engenheiro mecânico.

À DIFERENCIAL E.J pelos ensinamentos e pelas amizades.

Agradeço à Maria Clara por todo suporte e companheirismo nessa etapa tão difícil.

Minha infinita gratidão a minha casa: UAIMANO, em especial: K9, TCHU-TCHU, Solkent, Mute, Fogueteiro, Reveion, Pirulito, JBL, Kintasseri, Aviãozin, Sedex, JK, Sapo, Toneladas, Didico, Greg, Lucas e Arya. Me despeço citando alguém que eu não conheço, mas que hoje, graças a vocês, sou capaz de compreender: “Dinheiro vem e vai, a gente sabe disso. A coisa mais importante sempre vão ser as pessoas que estão aqui. Aqui e agora”.

Meus caros amigos de Ouro Preto, de Ponte Nova, da República, meu muito obrigado.

A todo pessoal, adeus!

“O mundo era tão recente que muitas coisas careciam de nome, e para mencioná-las era preciso apontar com o dedo”.

Gabriel García Márquez

RESUMO

Este trabalho teve como motivação a elaboração de um projeto mecânico que possibilite aulas práticas em laboratório para o curso de Engenharia Mecânica, especificamente para a área de Elementos de Máquinas, visto que o aprendizado prático permite que os estudantes visualizem, manuseiem e testem os elementos estudados, relacionando os conceitos teóricos com situações reais de engenharia. Desta forma, foram levantados os elementos mecânicos centrais do projeto da bancada didática, sendo eles o volante de inércia, o freio a disco e a transmissão de potência por correia, elementos estes de alta relevância para a engenharia mecânica, visto sua vasta aplicabilidade em indústrias, como exemplo de mineradoras, petrolíferas e a área automotiva. A metodologia deste trabalho consiste na idealização e concepção de um modelo, para o qual foi elaborado o seu projeto detalhado, sendo desenvolvidos suas etapas de montagem e construção, em que foram descritos os posicionamentos dos componentes a fim de garantir seu funcionamento desejado, segurança e estabilidade. A seleção e aquisição de elementos de máquinas reciclados, fez com que o projeto priorizasse o aproveitamento de recursos disponíveis e a sustentabilidade. Com isso, foi possível a realização do dimensionamento destes componentes, a partir do qual obteve-se os dados necessários para a realização dos cálculos analíticos, estabelecendo os parâmetros e pré-requisitos para o projeto, em que foi encontrado o momento de inércia dos volantes no valor de $0,1295 \text{ Kg/m}^2$, velocidade angular de $207,35 \text{ rad/s}$, energia cinética total como sendo $2779,56 \text{ J}$, torque de frenagem sendo $279,3 \text{ N.m}$ e pré-carga inicial na correia no valor de $47,2 \text{ N}$. Sendo assim, o projeto da bancada foi aprimorado e otimizado, de acordo com as peças adquiridas e disponíveis. O modelamento 3D, assim como os desenhos técnicos permitiram a estruturação completa do projeto, em que todas as peças foram modeladas de acordo com as dimensões reais dos componentes, assim como definidos o escopo de seus posicionamentos e montagem. Dessa forma, foi possível desenvolver e projetar a bancada didática, tornando possível sua eventual construção e utilização em aulas de laboratório.

Palavras-chave: bancada didática, elementos de máquina, freio, volante de inércia, projeto mecânico, montagem, cálculos estruturais, transmissão de potência.

ABSTRACT

This work was motivated by the development of a mechanical project that enables practical laboratory classes for the Mechanical Engineering course, specifically in the area of Machine Elements. Practical learning allows students to visualize, handle, and test the studied components, connecting theoretical concepts with real engineering situations. In this context, the central mechanical elements of the didactic bench project were identified: the flywheel, the disc brake, and the belt power transmission system. These elements are highly relevant to mechanical engineering due to their widespread application in industries such as mining, oil, and automotive sectors. The methodology of this work involves the ideation and design of a model, for which a detailed project was developed, including the assembly and construction stages. These stages describe the positioning of the components in order to ensure their proper functioning, safety, and stability. The selection and acquisition of recycled machine elements allowed the project to prioritize the use of available resources and sustainability. As a result, it was possible to carry out the dimensioning of these components, obtaining the necessary data for analytical calculations and establishing the parameters and prerequisites for the project. The following results were obtained: a flywheel moment of inertia of 0.1295 kg/m^2 , an angular velocity of 207.35 rad/s , a total kinetic energy of 2779.56 J , a braking torque of $279.3 \text{ N}\cdot\text{m}$, and an initial belt preload of 47.2 N . Thus, the bench design was refined and optimized according to the components acquired and available. The 3D modeling and technical drawings enabled the complete structuring of the project, with all parts modeled based on the actual dimensions of the components, as well as the definition of their positioning and assembly scope. This made it possible to design and develop the didactic bench, allowing for its eventual construction and use in laboratory classes.

Keywords: *didactic workbench, machine elements, brake, flywheel, mechanical design, mechanical assembly, structural calculations, power transmission.*

LISTA DE SIMBOLOS

θ - Ângulo [Rad]

T – Torque [N.m]

F – Força [N]

μ – Atrito

N – Rotação do Motor [RPM]

I – Momento de Inércia [kg/m^2]

ω – Velocidade Angular [rad/s]

F_i – Tensão inicial [N]

ρ_a – Pressão normal aplicada a pastilha [Mpa]

r_i – Raio Interno da pastilha de freio [mm]

r_o – Raio Externo da pastilha de freio [mm]

v – Velocidade Linear [m/s]

i – Relação de Transmissão

P – Potência [W]

$\ddot{\theta}$ – Aceleração Angular [rad/s^2]

K - Constante de proporcionalidade do sistema

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do Projeto	4
Figura 2 - Volante de Inercia	6
Figura 3 - Eficiência de um ciclo.....	7
Figura 4 - Dispositivo Freio - Embreagem.....	10
Figura 5 -Freio a Disco Único	10
Figura 6 - Geometria da área de contato de um segmento anular de pastilha de freio.....	11
Figura 7 - Campo Magnético Gerado por uma Turbina	13
Figura 8 -Transmissão por engrenagens e transmissão por correia.....	14
Figura 9 - Principais disposições dos eixos para transmissões por correias: a)Aberta; b)Cruzada; c)Semicruzada Fonte: Almeida (2022).....	14
Figura 10 - Correias em V	15
Figura 11 - Torque e forças em uma polia	16
Figura 12 - Fluxograma de Processos	20
Figura 13 - Diagrama Inicial da Bancada.....	23
Figura 14 - Diagrama Bancada.....	26
Figura 15 - Diagrama Bancada Segundo Posicionamento	27
Figura 16 - Volante 1.....	28
Figura 17 - Volante 2.....	28
Figura 18 - Freio a Disco.....	29
Figura 19 - Volante 1.....	38
Figura 20 - Desenho Técnico Volante 1	38
Figura 21 - Volante 2.....	39
Figura 22 - Desenho Técnico Volante 2	39
Figura 23 - Anel de Expansão	40
Figura 24 - Mancal de Rolamento	41
Figura 25 -Mancal Com Parafusos	42
Figura 26 - Desenho Técnico Mancal.....	42
Figura 27 - Eixo árvore.....	43
Figura 28 - Polia Escalonada	44
Figura 29 - Desenho Técnico Polia	44
Figura 30 - Motor Elétrico Vista Isométrica	45
Figura 31 - Motor Elétrico Vista Superior	46

Figura 32 - Motor Elétrico Vista Lateral	46
Figura 33 - Dinamômetro	47
Figura 34 - Freio a Disco	48
Figura 35 - Desenho Técnico Freio a Disco	49
Figura 36 - Cubo.....	50
Figura 37 - Modelagem do Cubo.....	50
Figura 38 - Desenho Técnico do Cubo	51
Figura 39 - Diagrama do acionador da pastilha de freio	52
Figura 40 - Modelo da Base da Pastilha	53
Figura 41 - Desenho Técnico da Base da pastilha.....	53
Figura 42 - Alavanca	54
Figura 43 - Montagem Base, Pastilha de Freio e Alavanca.....	55
Figura 44 - Desenho Técnico da Base	55
Figura 45 - Montagem Base com Dinamômetro	56
Figura 46 - Desenho Técnico montagem Base e Dinamômetro.....	56
Figura 47 - Bancada Vista Isométrica	57
Figura 48 - Bancada Vista Superior	58
Figura 49 - Desenho Técnico da Bancada Vista Superior.....	59
Figura 50 - Desenho Técnico da Bancada	60
Figura 51 - Montagem do Eixo	60
Figura 52 - Bancada e Mancais	61
Figura 53 - Eixo montado na Bancada	61
Figura 54 - Motor Elétrico e Correia	62
Figura 55 - Acionador da pastilha de freio	62
Figura 56 - Montagem Final Vista Isométrica	63
Figura 57 - Montagem Final Vista Superior.....	64
Figura 58 - Gaiola de Segurança	65
Figura 59 - Gaiola de Segurança Vista Superior	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de Materiais Inicial.....	22
Tabela 2 - Variáveis e Indicadores	24
Tabela 3 - Lista de Materiais Final Fonte: Pesquisa Direta (2024).....	27
Tabela 4 - Dimensões e pesos dos volantes.....	29
Tabela 5 - Volante de Inercia	37
Tabela 6 - Freio a Disco	37
Tabela 7 - Transmissão de Potência	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Geral	2
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Projeto Mecânico.....	4
2.2	Volante de Inercia.....	5
2.3	Freio a Disco.....	9
2.4	Motor Elétrico.....	13
2.5	Transmissão de Potência	14
2.6	Conclusões do Capítulo	18
3	METODOLOGIA.....	19
3.1	Tipo de Pesquisa.....	19
3.2	Materiais e Métodos	20
3.2.1	Requisitos do Projeto.....	21
3.2.2	Parâmetros de Seleção dos Componentes	21
3.2.3	Lista de Materiais	22
3.2.4	Modelagem 3D em CAD.....	22
3.2.5	Diagrama Inicial da Bancada.....	23
3.3	Variáveis e Indicadores	23
3.4	Instrumento de coleta de dados	24
3.5	Tabulação de Dados.....	25
3.6	Conclusões do capítulo.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1	Diagrama da bancada didática.....	26
4.2	Cálculos Estruturais.....	28
4.2.1	Volante de Inercia.....	30
4.2.2	Freio a Disco.....	33
4.2.3	Transmissão de potência.....	34
4.2.4	Tabelas de valores	37
4.3	Modelagem 3D	38
4.3.1	Volantes de Inercia	38
4.3.2	Mancais de rolamento.....	41
4.3.3	Eixo Árvore	43
4.3.4	Polia Escalonada.....	43
4.3.5	Motor Elétrico	45
4.3.6	Dinamômetro.....	47
4.3.7	Freio a Disco.....	48
4.3.8	Mecanismo de Acionamento da Pastilha de Freio.....	51
4.3.9	Bancada de Metalon	57
4.3.10	Montagem.....	60

4.4	Montagem final.....	63
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	66
5.1	Conclusão	66
5.2	Recomendações	67
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	68
	ANEXO.....	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A engenharia, como área voltada ao desenvolvimento e inovação, requer uma formação abrangente que integre teoria e prática para contribuir com o avanço da ciência e da sociedade. Dentro desse contexto, a disciplina de Elementos de Máquinas desempenha um papel essencial ao aplicar conceitos teóricos, matemáticos e físicos no estudo de componentes mecânicos, suas funções e aplicações. Além disso, essa disciplina capacita os alunos para o desenvolvimento de projetos e montagens mecânicas, promovendo uma compreensão aprofundada dos mecanismos e sistemas utilizados na engenharia.

Nesse contexto, além do estudo teórico e do dimensionamento de peças e componentes, é fundamental a realização de aulas experimentais que proporcionem aos alunos um contato direto e prático com os temas estudados, visto que grande parte do conhecimento associado à engenharia mecânica exige experiências práticas e observáveis dos temas abordados. “A separação entre trabalho prático e aulas causa uma divisão na mente do aluno ao invés de relacionar a teoria a aplicação que reforça os conceitos básicos” (DOUGHTY et al, 1992)

Segundo David Kolb (2015), o aprendizado é mais eficaz quando envolve experiências práticas, permitindo que os alunos vivenciem, reflitam, conceituem e experimentem ativamente os conhecimentos adquiridos. Portanto, o contato direto com peças e montagens mecânicas em aulas experimentais e atividades de laboratório desempenha um papel essencial na assimilação dos conceitos da disciplina, proporcionando uma compreensão mais aprofundada e concreta dos princípios teóricos estudados. Essa abordagem prática não apenas facilita o aprendizado, mas também contribui significativamente para a formação de novos engenheiros mecânicos.

Desta forma, o desenvolvimento da Bancada Didática de Sistemas Mecânicos tem como objetivo possibilitar ao professor da disciplina a realização de aulas experimentais, demonstração de equipamentos e montagem mecânica, agregando as aulas conhecimento prático e empírico.

Nesse quesito, o presente trabalho apresenta a seguinte pergunta:

**Como projetar uma bancada didática para Estudos de Elementos de Máquinas:
Freio a Disco, Volante de Inércia e Transmissão de Potência?**

1.2 Justificativa

O estudo do projeto e da construção da bancada didática oferecerá aos alunos a oportunidade de aplicar, na prática, os conceitos teóricos adquiridos ao longo da graduação em Engenharia, fortalecendo sua compreensão e desenvolvendo habilidades essenciais aos estudantes. Além de permitir a análise experimental de conceitos aprendidos em sala como o cálculo do torque de frenagem e a avaliação de vibrações, o projeto possibilita modificações e adaptações em componentes e peças, estimulando a inovação e a resolução de problemas reais. Segundo Pekelman (2004), os laboratórios desempenham um papel fundamental na formação dos engenheiros, pois permitem a concretização do conhecimento teórico, viabilizam a solução de problemas práticos e preparam os estudantes para se adaptarem às diversas condições que enfrentarão no exercício da profissão.

Com a bancada didática, especificamente, os alunos terão contato direto com elementos mecânicos como Volantes de Inercia, Freios a Disco, Transmissão de Potência, elementos de fixação como Mancais de Rolamento, Aneis de Expansão e Cubos de Roda. Estes elementos, estudados nas aulas teóricas, estarão disponíveis para aulas práticas com a Bancada Didática, possibilitando sua visualização em uma montagem real, assim como a análise técnica de seus parâmetros, como velocidade angular, torque de frenagem e pré-carga de correia.

Adicionalmente, o projeto da bancada não estará restrito apenas a disciplina de Elementos de Máquinas, podendo a mesma ser utilizada em outros cursos e contextos, como a Engenharia de Controle e Automação e Engenharia Elétrica, além de também poder ser usada em projetos interdisciplinares, agregando valor e conhecimento à própria Universidade e auxiliando na formação de novos profissionais engenheiros.

Dessa forma, a escolha da bancada didática como tema de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) se justifica não apenas por sua aplicabilidade após a finalização do projeto, mas também pela oportunidade de integrar os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo da graduação e pelo potencial de contribuição para o ensino e aprendizado acadêmico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Projetar uma bancada didática que integre o volante de inércia, o sistema de frenagem a disco e a transmissão de potência por correia, acionada por motor elétrico, com o objetivo de

realizar análises experimentais das forças dinâmicas e dos torques aplicados, proporcionando aos alunos a oportunidade de avaliar e compreender os princípios dos Elementos de Máquinas e suas interações em sistemas mecânicos.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre os princípios do projeto mecânico e das peças e materiais selecionados para montagem da bancada;
- Selecionar os componentes: volante de inércia, freio a disco e sistema de transmissão de potência por correia, considerando as especificações e requisitos de operação para cada elemento mecânico.
- Desenvolver os cálculos analíticos: estudar as forças e os torques aplicados em cada um dos componentes da bancada.
- Realizar, utilizando o software SolidWorks, o modelamento 3D dos elementos de máquina, assim como sua montagem e desenhos técnicos.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado nos seguintes tópicos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados e Discussões e, por fim, Conclusão, além das referências bibliográficas e anexos.

O segundo capítulo será dedicado à fundamentação teórica, abordando conceitos relacionados à montagem mecânica, características dos equipamentos selecionados, materiais utilizados na construção do protótipo e métodos de simulação aplicados.

O terceiro capítulo irá detalhar as etapas e processos de concepção utilizados para conceber e projetar a bancada didática, as peças escolhidas, seus posicionamentos e disposições na montagem, assim como definir as variáveis e os indicadores do trabalho.

O quarto capítulo descreverá detalhadamente, utilizando o software SolidWorks, todo o desenvolvimento do protótipo da bancada, as peças e materiais escolhidos, assim como os cálculos estruturais da mesma.

No quinto capítulo, serão apresentados e analisados os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Projeto Mecânico

Projeto mecânico é o processo de desenvolvimento e criação de produtos, sistemas ou componentes mecânicos. Envolve a aplicação de conhecimentos de engenharia para conceber, projetar, analisar e implementar soluções técnicas que atendam a determinados requisitos funcionais, estruturais e operacionais.

Segundo Collins (2019), projeto mecânico é definido como um processo iterativo de tomada de decisão que tem como objetivo a criação e otimização de um novo ou aprimorado sistema de engenharia ou equipamento para atender a necessidade ou um desejo humano, com o compromisso da conservação das fontes de recursos e do impacto ambiental.

Shigley (2016) trata do projeto mecânico como um processo repetitivo com várias fases iterativas, em que se faz necessário formular um plano para entender uma necessidade específica ou resolver um problema. Segundo o autor, o desenvolvimento do projeto mecânico se dá por fases, que se relacionam por realimentações e interações.

A Figura 1 demonstra as fases do projeto, sendo elas: Identificação da necessidade, Definição do problema, Síntese, Análise e otimização, Avaliação e Apresentação. Assim como suas respectivas iterações e como as fases se relacionam.

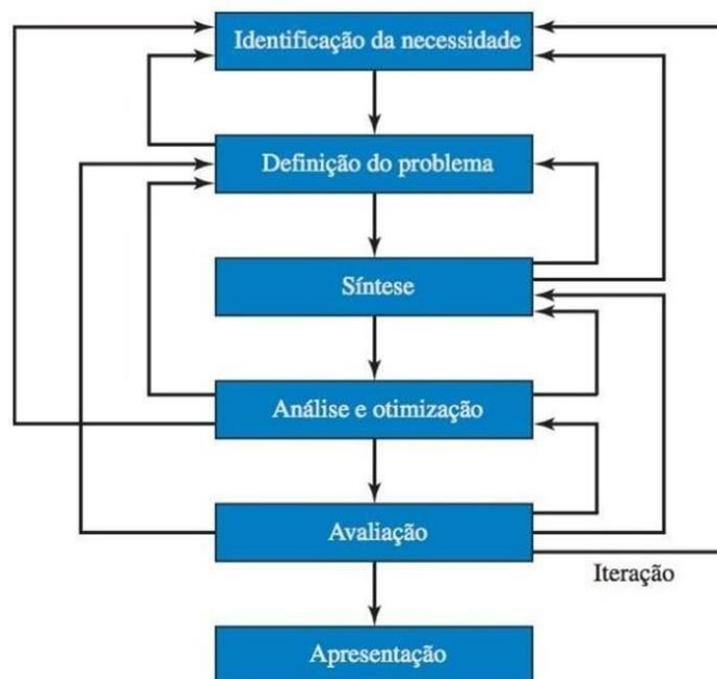


Figura 1 - Fases do Projeto
Fonte: Shigley (2016)

De acordo com Shigley (2016), o projeto mecânico se inicia com a identificação de uma necessidade e a decisão de se fazer algo a respeito. Sendo que muitas vezes a necessidade não é evidente, sendo seu reconhecimento normalmente acionado por uma determinada circunstância adversa.

A definição do problema se dá de maneira mais específica e deve incluir todas as especificações para o objeto a ser projetado, sendo elas quem definem o custo, quantidade a ser fabricada, vida útil esperada, o intervalo, a temperatura de operação e a confiabilidade.

As etapas de síntese, análise e otimização estão íntima e repetidamente ligadas. A síntese muitas vezes é denominada projeto conceitual. À medida que o esquema vai ganhando corpo, devem ser realizadas análises para avaliar se o desempenho do sistema é satisfatório ou melhor que o obtido anteriormente e, no caso de ser satisfatório, qual seu nível de desempenho. Os esquemas de sistemas que não passam pela análise são revisados, aperfeiçoados ou descartados.

Conforme enfatiza o autor, o projeto mecânico é um processo repetitivo no qual se passa por várias etapas, avaliando seus resultados e então retornando a uma fase anterior do procedimento.

A apresentação é a etapa final de um projeto, sendo este um trabalho mais correlacionado a vendas deste para terceiros.

2.2 Volante de Inércia

Segundo Shigley (2016), o volante é um aparato inercial de armazenamento de energia, em que o volante absorve energia mecânica aumentando a velocidade angular e repassa energia diminuindo sua velocidade.

A principal função de um volante de inércia é atuar como um amortecedor de energia, ajudando a suavizar e estabilizar a operação de um sistema. Quando um sistema está sujeito a flutuações de energia, como variações na velocidade ou torque, o volante de inércia permite que essa energia seja absorvida ou liberada gradualmente. Ele ajuda a manter uma operação mais constante e a evitar choques ou sobrecargas repentinas.

A Figura 2 representa um volante de inércia, com um torque de entrada correspondente a uma coordenada, e um torque de saída com coordenada.

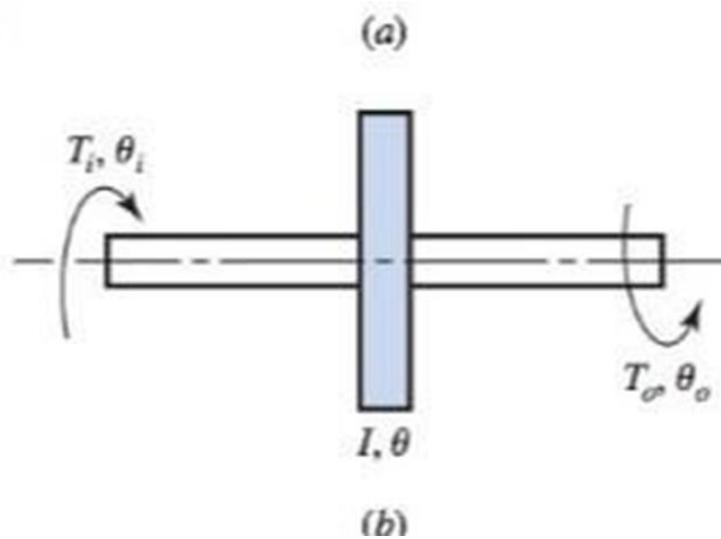


Figura 2 - Volante de Inercia
Fonte: Shigley (2016)

Para os cálculos referentes ao volante de inercia, primeiro deve se encontrar a quantidade de energia requerida para o grau desejado de suavidade, e logo após, determinar o momento de inercia da massa girante necessário para absorção de energia. Segundo Shigley (2016) a equação de movimento para a massa girante pela equação (1), em que M é o momento resultante atuante no volante, T_i é o torque de entrada, T_o o torque de saída e $\ddot{\theta}$ a aceleração angular:

$$\sum M = T_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) - T_o(\theta_o, \dot{\theta}_o) - I\ddot{\theta} = 0 \quad (1)$$

Ou:

$$I\ddot{\theta} = T_i(\theta_i, \omega_i) - T_o(\theta_o, \omega_o) \quad (2)$$

Assumindo um eixo rígido em que $\theta_i = \theta_o = \theta$ e $\omega_i = \omega_o = \omega$, a equação se torna:

$$I\ddot{\theta} = T_i(\theta, \omega) - T_o(\theta, \omega) \quad (3)$$

A Figura 3 representa a eficiência em 1 ciclo. Uma força de potência de entrada sujeita o volante a um torque constante T_i enquanto o eixo roda de θ_1 a θ_2 .

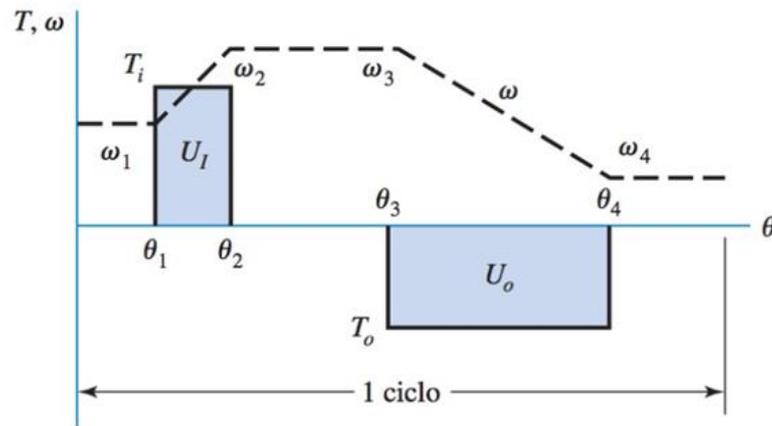


Figura 3 - Eficiência de um ciclo
Fonte: Shigley (2016)

O trabalho introduzido ao volante (U_i) é a área do retângulo entre θ_1 e θ_2

$$U_i = T_1(\theta_2 - \theta_1) \quad (4)$$

O trabalho transferido pelo volante (U_o) é a área do retângulo entre θ_3 e θ_4 :

$$U_o = T_0(\theta_4 - \theta_3) \quad (5)$$

Em $\theta = \theta_1$, o volante tem uma velocidade de ω_1 rad/seg, assim, sua energia cinética se dá por:

$$E_1 = \frac{1}{2} I \omega_1^2 \quad (6)$$

Em $\theta = \theta_2$, a velocidade é ω_2 rad/seg:

$$E_2 = \frac{1}{2} I \omega_2^2 \quad (7)$$

Logo, a mudança de energia cinética é:

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2} I (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (8)$$

Segundo o autor, é conveniente definir um coeficiente de flutuação de velocidade na forma:

$$C_s = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega} \quad (9)$$

Onde ω é a velocidade angular nominal dada por:

$$\omega = \frac{\omega_2 + \omega_1}{2} \quad (10)$$

Pode-se assim expressar a energia cinética como sendo:

$$E_k = \frac{1}{2} I_m \omega^2 \quad (11)$$

Onde, I_m é o momento de inércia da massa girante:

$$I_m = mr^2 \quad (12)$$

Logo:

$$I_s = \frac{E_k}{C_f \omega_{media}^2} \quad (13)$$

2.3 Freio a Disco

Para Collins (2019), freios e embreagens em termos de conceito são praticamente indistinguíveis. Em termos funcionais, uma embreagem é um dispositivo para conectar de forma suave e gradual dois componentes rotativos distintos, com velocidades angulares distintas em relação a uma linha de centro comum, trazendo os dois componentes para a mesma velocidade angular após o acionamento da embreagem.

Um freio possui função semelhante, com a diferença que um dos componentes é fixo a estrutura, de forma que a velocidade angular relativa seja nula após o acionamento do freio.

Segundo Almeida (2022), freios são dispositivos que se utilizam do atrito entre duas superfícies pressionadas uma com a outra para converter energia cinética em movimento e calor, embora outros métodos de conversão de energia possam ser empregados. Para quaisquer tipos de embreagem ou freio de atrito, o projetista precisa calcular ou estimar:

- Os requisitos de torque transmitido para a aplicação e a capacidade de transmissão de torque do dispositivo de freio;
- Os requisitos de força de acionamento;
- As limitações do dispositivo em função da pressão, temperatura, do desgaste ou da resistência;
- A geração de energia, a capacidade de dissipação de energia e o aumento esperado da temperatura do dispositivo, especialmente junto a interface do dispositivo.

Quanto aos modos prováveis de falha, segundo o autor, as embreagens e freios podem falhar por desgaste adesivo, desgaste abrasivo ou por desgaste corrosivo. Além disso, há a geração de calor na interface de atrito, frequentemente em taxas altas, fazendo com que ocorram falhas relacionadas à temperatura a qual este equipamento é submetido, como o empenamento (variação de comprimento elástico induzido por temperatura), escoamento, a fadiga térmica, a fluência e em casos extremos o choque térmico.

A Figura 4 demonstra a montagem de um dispositivo Freio/Embreagem:

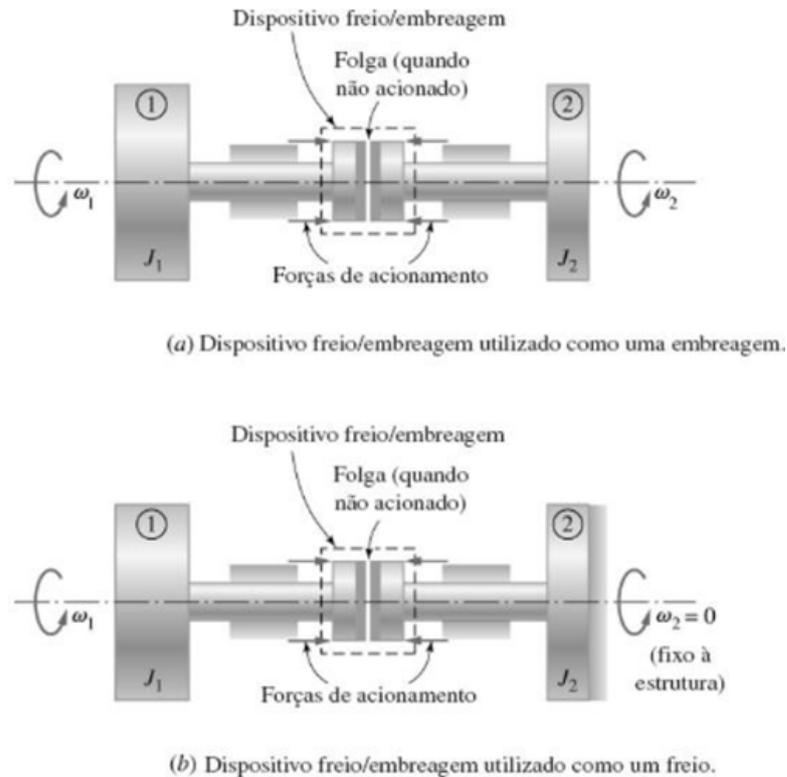


Figura 4 - Dispositivo Freio - Embreagem
Fonte: Collins (2019)

Na definição de Collins (2019), o freio a disco se caracteriza por interfaces de atrito, sendo que a unidade do freio é acionada apertando-se um disco central rotativo entre dois discos coaxiais alinhados enchavetados a um alojamento fixo. O dispositivo tem seu acionamento a partir da aplicação de forças axiais opostas aos discos enchavetados externos, provocando seu deslizamento e apertando o disco central entre os mesmos, para trazer todos os discos para uma velocidade comum. A Figura 5 demonstra um freio a disco:

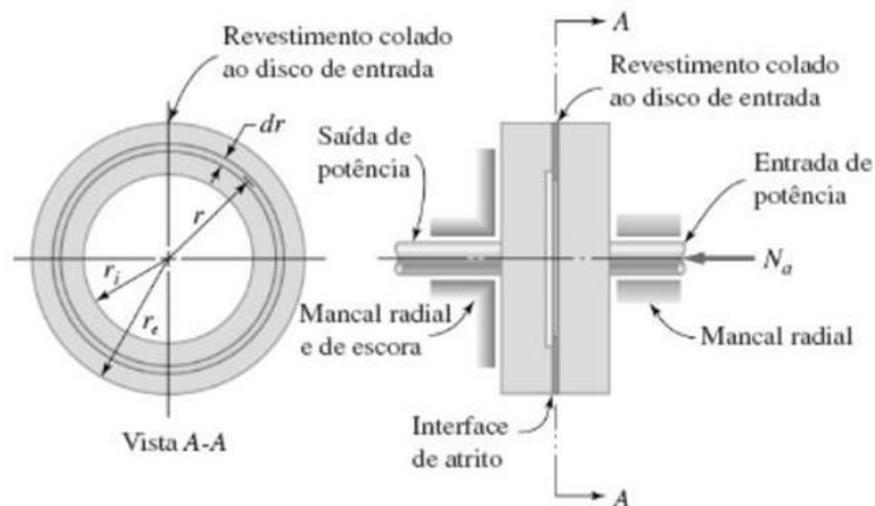


Figura 5 - Freio a Disco Único
Fonte: Collins (2019)

Devido a geração de calor concentrada dentro do dispositivo de freio a disco e em função da dificuldade de dissipar o calor gerado pelo atrito, este tipo de freio são raramente utilizados em aplicações de grande potência, pois excederiam as temperaturas admissíveis.

Este tipo de freio não é autodinâmico e normalmente precisam de grandes forças de acionamento axiais, sendo utilizados dispositivos auxiliares de potencia.

A fim de estudo para este tipo de freios, uma suposição de desgaste uniforme é feita para se estimar a distribuição de pressão, o torque de frenagem e a força de acionamento . Se os discos tendem a ser rígidos, o maior desgaste ocorrerá na região circunferencial externa do disco em função da maior velocidade tangencial nessa região. Após o desgaste inicial, a distribuição de pressão será alternada de forma que no final se obtenha um desgaste aproximadamente uniforme. A Figura 6 demonstra a geometria da área de contato de um segmento anular de pastilha de um freio de pinça.

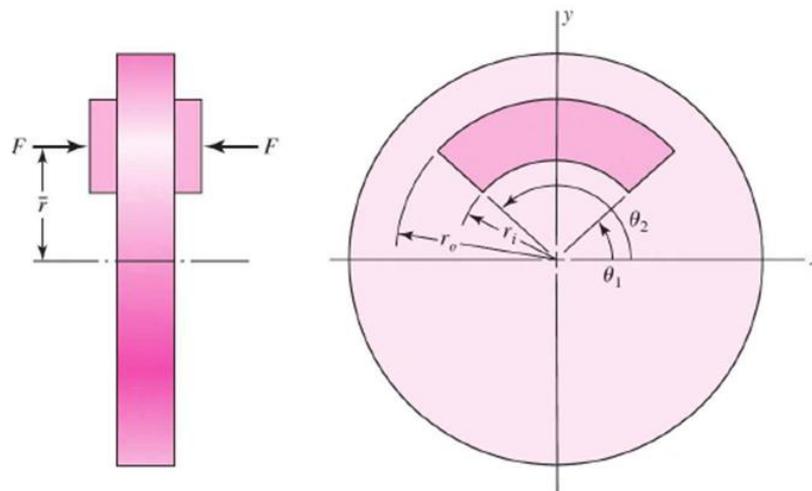


Figura 6 - Geometria da área de contato de um segmento anular de pastilha de freio
Fonte: Shigley(2019)

A equação que demonstra o desgaste axial é dada pela equação (14), sendo P a pressão aplicada a pastilha de freio, t o tempo de atuação do freio, K a constante de proporcionalidade do sistema, V a velocidade relativa entre o disco e a pastilha:

$$\omega = f_1 f_2 K P V t \quad (14)$$

A força de acionamento e o torque de fricção são dados pelas equações (15) e (16), sendo r_i o raio interno e r_o o raio externo:

$$F = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{r_i}^{r_o} pr \, dr \, d\theta = (\theta_2 - \theta_1) \int_{r_i}^{r_o} pr \, dr \quad (15)$$

$$T = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{r_i}^{r_o} f pr^2 \, dr \, d\theta = (\theta_2 - \theta_1) f \int_{r_i}^{r_o} pr^2 \, dr \quad (16)$$

Para que o desgaste axial seja o mesmo em todo lugar, o produto PV deve ser uma constante. A pressão pode ser expressa em termos da maior pressão admissível p_a (que ocorre no raio mais interno r_i) como:

$$p = p_a r_i / r \quad (17)$$

A equação (15) transforma-se em:

$$F = (\theta_2 - \theta_1) p_a r_i (r_o - r_i) \quad (18)$$

A equação (16) torna-se:

$$T = (\theta_2 - \theta_1) f p_a r_i \int_{r_i}^{r_o} r \, dr \quad (19)$$

Assim, o torque de frenagem pode ser expressa como:

$$T = \frac{1}{2} (\theta_2 - \theta_1) f p_a r_i (r_o^2 - r_i^2) \quad (20)$$

2.4 Motor Elétrico

Para Petruzella (2013), motores elétricos são utilizados para converter energia elétrica em energia mecânica.

De acordo com Filho (2013), o motor funciona pelo princípio da indução magnética, a variação do fluxo magnético no interior de uma espira promove a indução de tensão em seus terminais. Se estes terminais forem curto-circuitados, haverá circulação de uma corrente elétrica induzida.

O motor elétrico consiste em duas partes principais: o estator e o rotor. O estator é a parte estacionária do motor e é composto por bobinas enroladas em torno de um núcleo de ferro laminado. O rotor é a parte móvel e geralmente é composto por um eixo e um conjunto de enrolamentos ou ímãs permanentes.

O funcionamento do motor elétrico é baseado na interação entre os campos magnéticos gerados pelo estator e pelo rotor. Quando uma corrente elétrica é aplicada ao estator, as bobinas produzem um campo magnético giratório. Esse campo magnético interage com o campo magnético gerado pelo rotor, o que resulta em um torque que faz o rotor girar.

A Figura 7 demonstra o princípio de funcionamento da geração de campos magnéticos pelas bobinas:

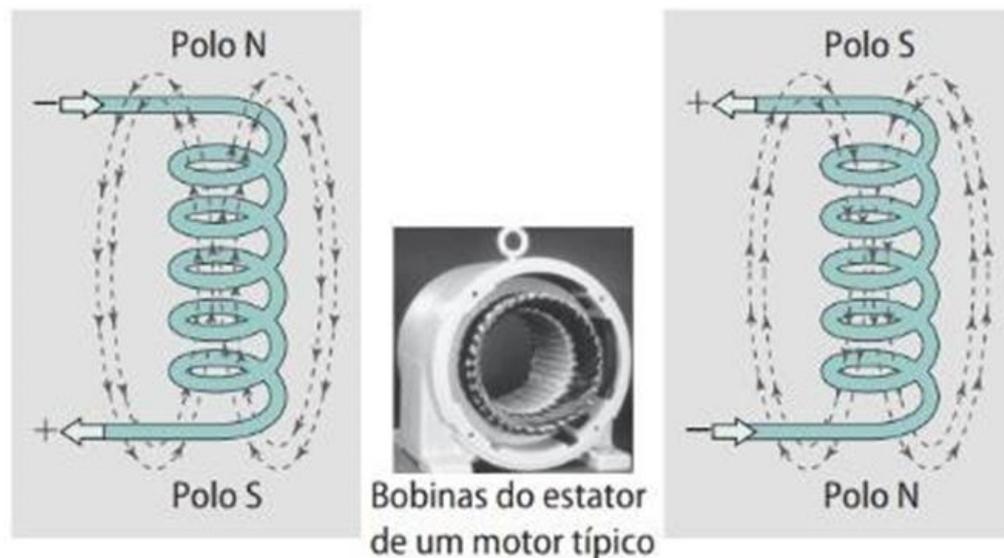


Figura 7 - Campo Magnético Gerado por uma Turbina
Fonte: Eletrical Apparatus Service Association (2015)

2.5 Transmissão de Potência

Conforme Niemann (1971), na transmissão por correia, a correia abraça duas ou mais polias, transmitindo assim, a força tangencial por meio do atrito entre a correia e a polia. A Figura 8 demonstra a diferença de montagem entre transmissões por engrenagens e por correias.

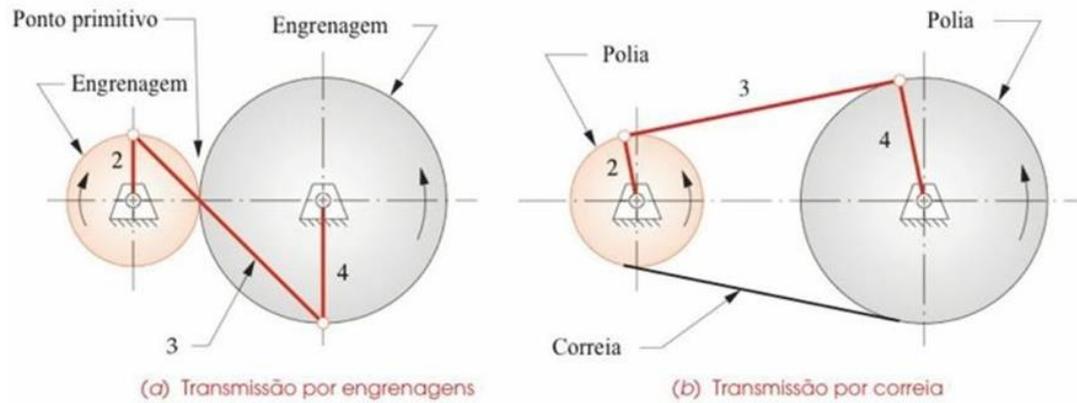


Figura 8 - Transmissão por engrenagens e transmissão por correia
Fonte: Norton (2010)

A figura 8 ilustra as diferentes disposições dos eixos em um sistema de transmissão por correia.

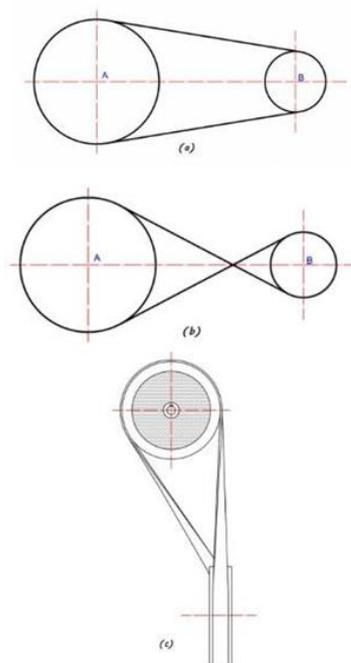


Figura 9 - Principais disposições dos eixos para transmissões por correias: a) Aberta; b) Cruzada; c) Semicruzada
Fonte: Almeida (2022)

Na definição de Almeida (2022), transmissões por correias, na sua concepção mais tradicional, envolvem normalmente a utilização de eixos paralelos, porém, disposições variadas podem ser utilizadas em virtude da necessidade do projeto. A variação dos eixos, como demonstrado na Figura 8, somente se torna possível em razão da flexibilidade da correia envolvida.

A Figura 10 demonstra as correias em V, que apresentam padronização quanto aos seus tamanhos, sendo elas: Hi-Power (A,B,C,D e E) e PW (3V, 5V e 8V).

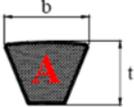
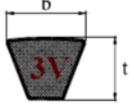
<i>HI-POWER</i>	<i>Seção</i>	<i>b [mm]</i>	<i>t [mm]</i>	<i>Faixa recomendada de diâmetros para a polia menor [mm]</i>		
				<i>d_{min}</i>	<i>d_{máx}</i>	<i>d_{limite}</i>
	A	13	8	76	127	710
	B	17	11	127	188	1000
	C	22	14	188	330	1600
	D	32	19	330	432	2000
	E	38	23	432	710	2500
	3V	9.5	8	68	304	–
	5V	16	13.5	180	406	–
	8V	25.4	22	320	570	–
$\varphi = \text{ângulo da correia "V"} (34^\circ \text{ a } 42^\circ)$						

Figura 10 - Correias em V
Fonte: Almeida (2022)

A potência projetada pode ser desenvolvida como:

$$P_p = P_{motor} \cdot f_s \quad (21)$$

Em que:

- P_p : Potencia projetada em CV
- P_{motor} : Potencia do motor em CV
- f_s : Fator de serviço (Adimensional)

O cálculo da potência transmitida por uma correia pode ser expresso como:

$$P_{corr} = (HP_{básico} + HP_{adicional}) \times F_l \quad (22)$$

Em que:

- $HP_{básico}$: Capacidade de transmissão da correia caso as polias possuam o mesmo diâmetro
- $HP_{adicional}$: Fator de correção aplicado devido a diferença de diâmetros entre as polias, depende da relação de transmissão.
- F_l : fator de correção para o comprimento da correia e seu perfil

A determinação do número de correias pode ser expressa como:

$$N = \frac{P_{H\rho}}{(P_{correia} \cdot C_a)} \quad (23)$$

Em que:

- $P_{H\rho}$ = Potência a ser transmitida
- $P_{correia}$ = Capacidade de transmissão da correia escolhida
- C_a = Fator de correção para o arco de contato

A Figura 11 demonstra o torque e forças em uma montagem com polia:

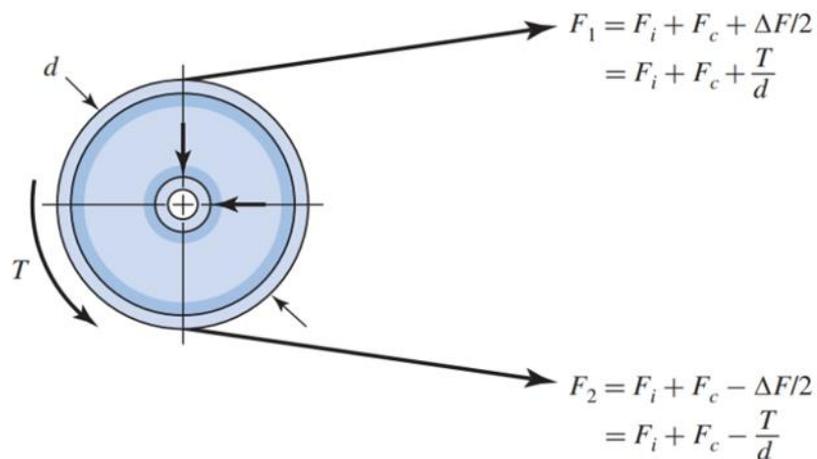


Figura 11 - Torque e forças em uma polia
Fonte: Shigley (2019)

Para o cálculo da pré-carrega da correia, tem-se:

$$F_1 - F_2 = \frac{2T}{D} = \frac{T}{D/2} \quad (24)$$

Em que:

$$F_1 = F_i + F_c + \Delta F' = F_i + F_c + \frac{T}{D} \quad (25)$$

$$F_2 = F_i + F_c - \Delta F' = F_i + F_c - \frac{T}{D} \quad (26)$$

Sendo:

- F_i : Tensão inicial
- F_c : Tensão da correia devido a força centrífuga
- $\Delta F'$: Tensão decorrente do torque transmitido T
- D : Diâmetro da polia

Somando-se (24) com (25):

$$F_1 + F_2 = 2F_i + 2F_c \quad (27)$$

Tem-se a pré-carrega Inicial (F_i):

$$F_i = \frac{F_1 + F_2}{2} - F_c \quad (28)$$

Dividindo-se (28) por (27), com manipulação algébrica, tem-se:

$$\frac{F_i}{T/D} = \frac{\exp(f\phi) + 1}{\exp(f\phi) - 1} \quad (29)$$

Obtendo-se a força de pré-carga:

$$F_i = \frac{T \exp(f\phi) + 1}{D \exp(f\phi) - 1} \quad (30)$$

Se a força de pré-carga for zero, então não há força inicial para iniciar a transmissão, assim, o torque é proporcional a pré-carga inicial. Substituindo (30) em (25), tem-se:

$$F_1 = F_c + F_i \frac{2 \exp(f\phi)}{\exp(f\phi) + 1} \quad (31)$$

Substituindo (30) em (26), tem-se:

$$F_2 = F_c + F_i \frac{2}{\exp(f\phi) + 1} \quad (32)$$

2.6 Conclusões do Capítulo

Sendo assim, a referência bibliográfica do projeto mecânico, assim como de seus elementos de interesse para estudos principais, sendo eles a transmissão de potência, o freio a disco e o volante de inércia, foi realizada a partir da análise e estudo dos livros didáticos dos principais autores área, tornando possível o desenvolvimento da base teórica para o projeto.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são abordadas as metodologias aplicadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Esta seção englobará o tipo de pesquisa, materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumento de coleta de dados, tubulação de dados e considerações finais.

3.1 Tipo de Pesquisa

Os procedimentos técnicos podem variar de acordo o método de obtenção de dados, podendo elas serem: Pesquisa bibliográfica, Pesquisa documental, pesquisa experimental, pesquisa de campo, pesquisa ação, etc.

De acordo com Pradonov e Freitas (2013), o objetivo da pesquisa é buscar respostas para questões por meio da aplicação do método científico. Os autores também destacam que os critérios para classificar os tipos de pesquisa variam conforme o enfoque, os campos de estudo, os interesses, as metodologias, as situações e os objetos de análise. Lakatos e Marconi (2007) definem a pesquisa como “um procedimento formal com método de pensamento reflexivo que exige tratamento científico, constituindo-se no caminho para se conhecer a realidade ou descobrir verdades parciais.”

Em relação aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como exploratória, explicativa ou descritiva. A pesquisa descritiva é caracterizada pelo registro e descrição dos fatos observáveis, sem a interferência do pesquisador. A pesquisa explicativa, por sua vez, busca entender as causas e razões dos fenômenos, analisando, registrando, classificando e interpretando os dados observados. Segundo GIL (2006), a pesquisa exploratória inclui métodos como a pesquisa de campo, estudo de caso e pesquisa bibliográfica.

Quanto à abordagem, esta pode ser qualitativa ou quantitativa. De acordo com Richardson (2015), a abordagem quantitativa é caracterizada pela “utilização da quantificação tanto nas modalidades de coleta de informações quanto no seu tratamento por técnicas estatísticas, que podem variar desde as mais simples, como percentuais, médias e desvios-padrão, até as mais complexas, como coeficiente de correlação e análise de regressão.” Já a abordagem qualitativa, segundo Pradonov e Freitas (2015), tem o ambiente como fonte direta dos dados, exigindo que o pesquisador realize um trabalho mais intensivo em campo, mantendo contato direto com o ambiente e o objeto de estudo.

Pradonov e Freitas (2013) classificam a pesquisa conforme sua abordagem, procedimentos técnicos e objetivos. Para o presente trabalho, consideram-se as abordagens qualitativa, além de pesquisa bibliográfica e experimental.

3.2 Materiais e Métodos

Os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho estão descritos no fluxograma (Figura 12):

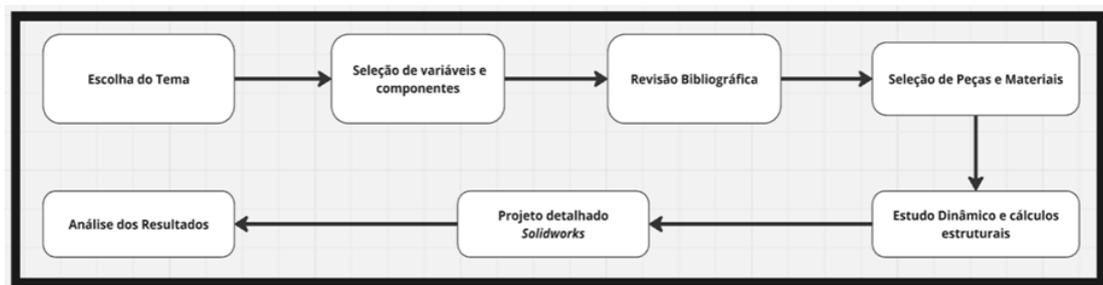


Figura 12 - Fluxograma de Processos
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

O fluxograma apresentado descreve as etapas do desenvolvimento deste trabalho de forma sistemática. O processo teve início com a definição do tema e a identificação da área de aplicabilidade, estabelecendo o escopo do estudo. A seguir, foi realizada a seleção dos elementos de máquina a serem integrados na bancada de estudo, como o volante de inércia, o sistema de frenagem a disco e a transmissão por correia, além das variáveis dinâmicas associadas a cada componente.

Com a escolha dos componentes, iniciou-se uma revisão bibliográfica detalhada, cujo objetivo foi embasar a seleção das peças e materiais mais adequados para a aplicação, considerando aspectos como resistência, durabilidade e funcionalidade. A partir dessa análise, foram realizados os estudos dinâmicos e os cálculos estruturais necessários para garantir a viabilidade do projeto. Para complementar o desenvolvimento do projeto, o modelo detalhado da bancada foi elaborado no software SolidWorks, sendo realizado o modelamento 3D das peças selecionadas, assim como sua montagem e posicionamentos.

3.2.1 Requisitos do Projeto

Em primeiro momento, baseando-se na idealização inicial do protótipo em ser utilizado para a matéria de Elementos de Máquinas, foi feita a análise curricular da disciplina junto ao professor discente, selecionando os temas e elementos mecânicos de principal interesse de estudo para o projeto em relação a área para qual a bancada está voltada. A matéria abrange elementos mecânicos como os de fixação (parafusos, porcas, rebites e chavetas), eixos, mancais, freios e embreagens, rolamentos, elementos de transmissão como engrenagens e correias, volantes de inércia, dentre outros.

Com isso, foram definidos quais os conceitos principais a bancada deverá abordar, sendo eles: Momento de Inércia, Velocidade Angular, Torque de frenagem, Transmissão de Potência, Relações de Transmissão e Eficiência Mecânica.

Foram selecionados os três componentes mecânicos principais para o protótipo, sendo eles o Volante de Inércia, o Freio a Disco e a Transmissão de Potência por Correia. Estes elementos foram escolhidos por disponibilizar os dados necessários para a análise dos conceitos fundamentais estabelecidos para a bancada, e também pela sua importância não só para a disciplina em si, mas para com o curso de Engenharia Mecânica como um todo, visto a aplicabilidade e uso destes componentes em diversos sistemas e montagens mecânicas presentes na indústria e no mercado de trabalho em geral. Estes três componentes permitem o estudo de importantes referenciais teóricos estudados ao longo do curso, agregando para a utilização e estudo da bancada, diferentes conhecimentos como Física, Cálculo, Manutenção Mecânica, Desenho Técnico e Projeto Mecânico.

3.2.2 Parâmetros de Seleção dos Componentes

Selecionados os elementos mecânicos de estudo, as demais peças que irão compor a bancada foram selecionadas com base nos requisitos para a montagem dos componentes, assim como também foi levado em conta a disponibilidade prévia e preço comercial, de modo a tornar viável a construção da bancada. São eles: O Eixo Árvore, no qual estarão acoplados o Volante de Inércia, a Polia Escalonada que fará a transmissão de Potência para o eixo através da correia, e o freio a disco. Mancais de Rolamento, que farão a fixação do eixo na estrutura da bancada, o motor elétrico que irá fornecer energia ao sistema, e os dinamômetros, para coleta dos dados.

O freio a disco, assim como o volante de inércia, foram adquiridos em ferros velhos e oficinas mecânicas, por um baixo preço de custo.

3.2.3 Lista de Materiais

A bancada inicialmente será composta pela seguinte lista de materiais inicial, representados na Tabela 1, contemplando os elementos mecânicos selecionados para estudo, assim como as demais peças necessárias para a montagem e funcionamento requerido para o projeto. Sendo:

Tabela 1 - Lista de Materiais Inicial

Peças	Quantidade
Eixo	01
Mancais de rolamento	03
Volante de Inércia	01
Freio a Disco	01
Motor Elétrico	01
Correia	01
Dinamômetro	01
Bancada	01

Fonte: Pesquisa Direta (2024)

3.2.4 Modelagem 3D em CAD

O modelo detalhado da bancada será elaborado no software SolidWorks, sendo realizado o modelamento 3D das peças selecionadas, assim como sua montagem e posicionamentos. O uso dessa ferramenta é fundamental para o projeto, uma vez que será possível visualizar a integração dos componentes, identificar possíveis interferências e realizar ajustes, viabilizando a fabricação da bancada. Além disso, o SolidWorks permitiu a geração de desenhos técnicos precisos, com todas as dimensões, tolerâncias e especificações necessárias para a execução do projeto.

3.2.5 Diagrama Inicial da Bancada

A Figura 15 representa a disposição dos componentes da bancada utilizando a plataforma *Miro*.

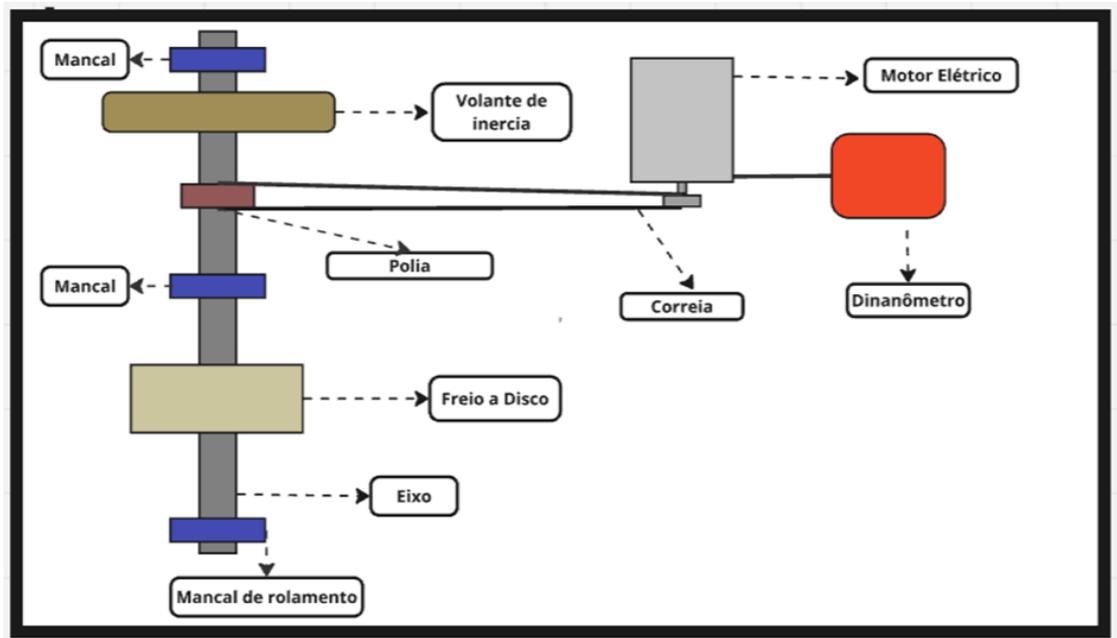


Figura 13 - Diagrama Inicial da Bancada
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo KÖCHE (2015), variável pode ser conceituada como: “aspectos, propriedades, características individuais ou fatores, mensuráveis ou potencialmente mensuráveis, através dos diferentes valores que assumem, discerníveis em um objeto de estudo, para testar a relação enunciada em uma proposição”.

Para Gil (2017), os indicadores permitem transformar as variáveis em dados quantitativos, facilitando sua análise e interpretação.

A tabulação das variáveis e indicadores está descrita na Tabela 2:

Tabela 2 - Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Volante de Inércia	Energia Cinética Velocidade Angular
Freio a Disco	Torque de Frenagem
Transmissão de Potência	Tipo de Correia Pré-carga

Fonte: Pesquisa Direta (2024)

3.4 Instrumento de coleta de dados

Esta seção diz respeito aos instrumentos utilizados para realização da coleta dos dados necessários para o projeto da bancada, sendo ela composta por peças mecânicas, os instrumentos foram:

- Estudo de Desenhos Técnicos dos materiais selecionados
- Medições e pesagem das peças já adquiridas
- Análise de catálogos de fabricantes

O estudo dos desenhos técnicos dos materiais selecionados e a análise de catálogos de fabricantes, garantiu maior precisão no modelamento 3D das peças, resultando em dimensões e tamanhos precisos das peças na montagem final do projeto.

As medições e pesagem das peças já adquiridas foi-se necessário para a realização dos cálculos estruturais referentes a bancada.

3.5 Tabulação de Dados

Os dados obtidos pelas medições e análise de desenhos técnicos foram devidamente registrados e compilados para posterior estudo utilizando o software *Microsoft Excel*.

Estes dados coletados e compilados serão estudados e interpretados para a obtenção dos dados procurados, sendo que a discussão e interpretação de tais dados será feita com a utilização do *Microsoft Word*.

3.6 Conclusões do capítulo

Este capítulo teve como objetivo descrever a metodologia do trabalho proposto, seus equipamentos e métodos, assim como a descrição do protótipo e como dará seu funcionamento. Desta forma, foram apresentados os equipamentos, softwares utilizados, instrumentos de medição e coleta de dados. No próximo capítulo será detalhado os processos de fabricação e montagem da bancada, suas etapas e conclusões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Diagrama da bancada didática

Em primeiro momento, foram feitos os levantamentos das peças e elementos mecânicos de interesse para estudo dessa bancada. Peças já disponíveis em posse do professor orientador foram selecionadas, sendo elas: Polia, Dinamômetro, Mancais de Rolamento. Demais peças, em detrimento do custo de compra e disponibilidade, foram encontradas e selecionadas em ferros-velhos, oficinas mecânicas, locais de descarte. Isso fez com que a ideia do Diagrama inicial apresentado no capítulo 3 fosse reformulado e aprimorado de acordo com as peças e elementos disponíveis.

Sendo assim, adaptando e otimizando a ideia inicial da bancada apresentado no capítulo 3, desenvolveu-se o diagrama final apresentado na Figura 14, utilizando a plataforma *Miro*.

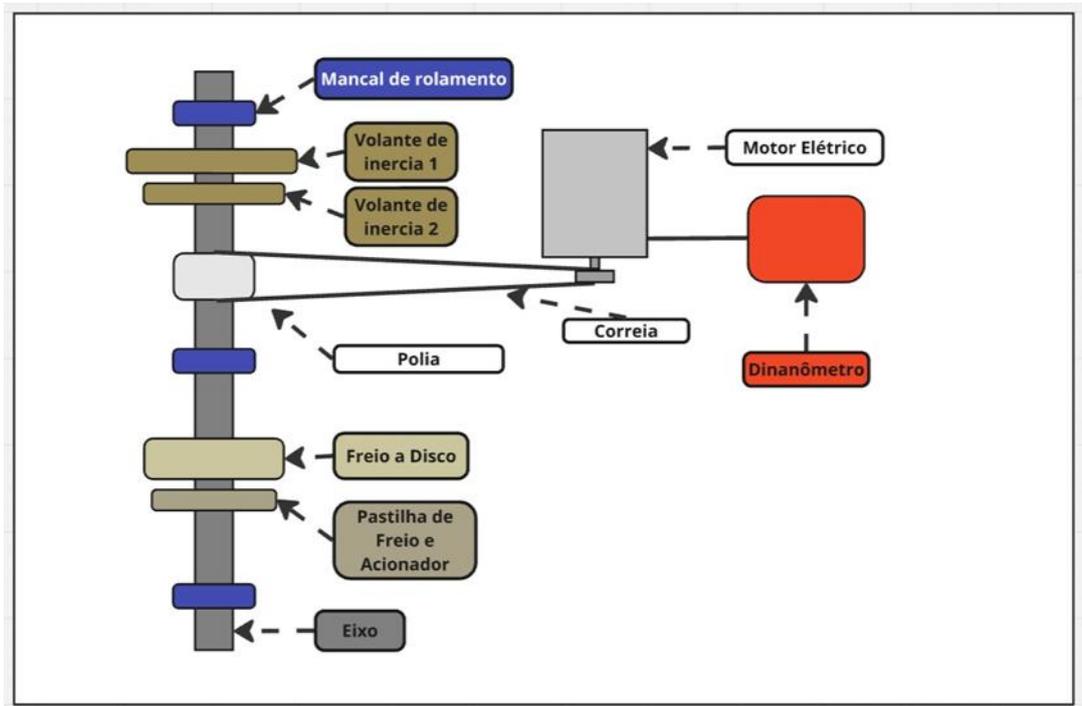


Figura 14 - Diagrama Bancada
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

O eixo árvore estará fixo a bancada por 3 mancais de rolamento, nele estarão acoplados dois volantes de inércia de diâmetros e peso diferentes um do outro, o freio a disco, uma base que suportará a pastilha de freio e sua alavanca acionadora, e por fim a polia escalonada ligada por uma correia ao motor elétrico, que fornecerá a energia ao sistema. Como a bancada contará com apenas um dinamômetro, a sua estrutura foi idealizada para que o mesmo pudesse ser

posicionado em dois elementos distintos: No Motor Elétrico, como mostrado na figura 19, e na alavanca de acionamento da pastilha de freio, como mostra a Figura 15:

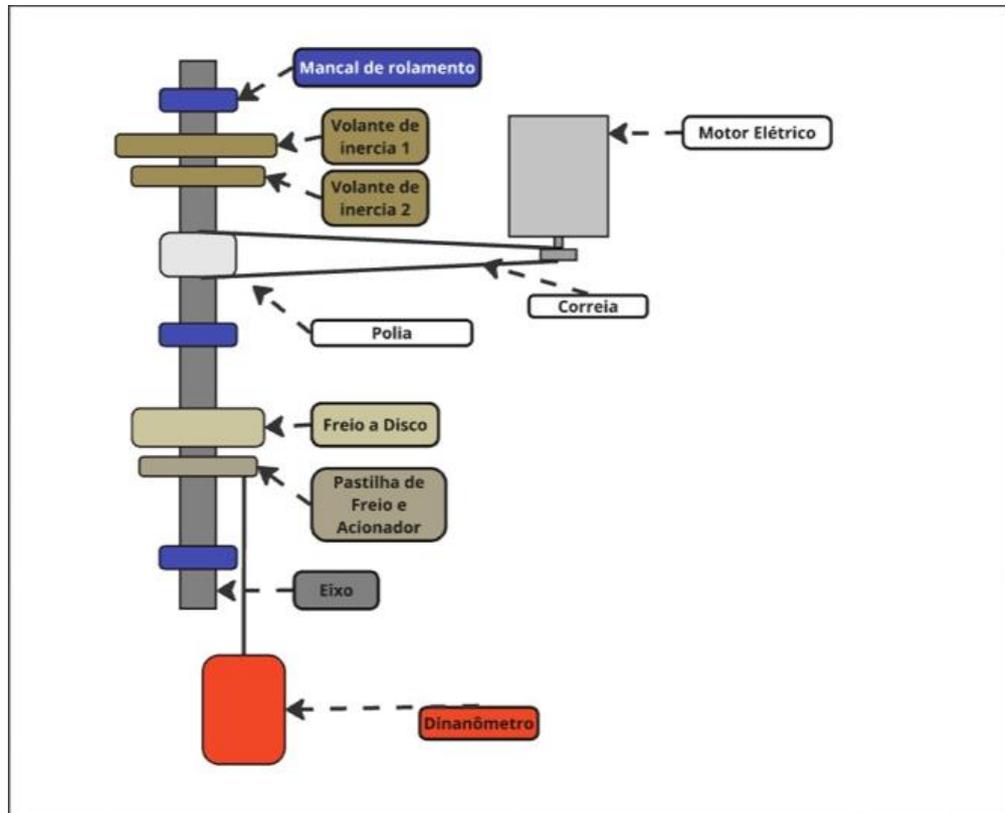


Figura 15 - Diagrama Bancada Segundo Posicionamento
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Dessa forma, os elementos que irão compor a bancada estão descritos na Tabela 3:

Tabela 3 - Lista de Materiais Final

Peças	Quantidade
Eixo	01
Mancais de rolamento	03
Volante de Inércia	02
Freio a Disco	01
Motor Elétrico	01
Correia	01
Dinamômetro	01
Bancada	01

Fonte: Pesquisa Direta (2024)

4.2 Cálculos Estruturais

Dois volantes de inércia foram selecionados em ferros-velhos para o projeto da bancada. Eles são apresentados nas Figuras 16 e 17:



Figura 16 - Volante 1
Fonte: Pesquisa Direta (2024)



Figura 17 - Volante 2
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Os volantes de inércia têm pesos e diâmetros diferentes, conforme a Tabela 4:

Tabela 4 - Dimensões e pesos dos volantes

PEÇA	PESO (kg)	DIÂMETRO (mm)
Volante 1	7,4 kg	290 mm
Volante 2	6,6 kg	250 mm

Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Assim como os volantes de inercia, o freio a disco foi selecionado em uma oficina mecânica, sem custos, já que o mesmo estava para descarte. Esse freio originalmente pertence á um FIAT UNO MILLE, de ano desconhecido. A Figura 17 demonstra o freio selecionado:



Figura 18 - Freio a Disco

Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Selecionados os componentes da bancada, com suas respectivas propriedades e dimensões, é possível fazer os cálculos dos valores esperados de seus parâmetros. Sendo adotados para os cálculos:

- Motor: 1CV = 735,5W
- Volante 1: $\varnothing = 290\text{mm}$; $m=7,4\text{kg}$ (Raio Volante 1 = 0,145m)
- Volante 2: $\varnothing = 250\text{mm}$; $m = 6,6\text{kg}$ (Raio Volante 2 = 0,125m)
- Diâmetro menor da Polia: $\varnothing = 50\text{mm}$ (Raio = 0,0250m)
- Diâmetro da polia motora: $\varnothing = 55\text{mm}$ (Raio = 0,0275m)
- Assumindo RPM = 1800

4.2.1 Volante de Inercia

Calculo dos Momentos de Inércia dos Volantes:

$$I = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2 \quad (33)$$

Volante 1:

$$I_1 = \frac{1}{2} \cdot 7,4 \cdot (0,145)^2 \quad (34)$$

$$I_1 = \frac{1}{2} \cdot 7,4 \cdot 0,021025 \quad (35)$$

$$I_1 = 0,0777 \text{ kg/m}^2 \quad (36)$$

Volante 2:

$$I_2 = \frac{1}{2} \cdot 6,6 \cdot (0,125)^2 \quad (37)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \cdot 6,6 \cdot 0,015625 \quad (38)$$

$$I_2 = 0,0516 \text{ kg/m}^2 \quad (39)$$

Momento de Inercia Total:

$$I_{Total} = I_1 + I_2 \quad (40)$$

$$I_{Total} = 0,1295 \text{ kg/m}^2 \quad (41)$$

Os valores encontrados para o momento de inércia dos dois volantes são valores aproximados, devido a geometria complexa e detalhes de fabricação das peças selecionadas.

Velocidade Angular:

Convertendo RPM para Radianos por segundo:

$$\omega_{motor} = \frac{2\pi N_{motor}}{60} \quad (42)$$

$$\omega_{motor} = \frac{2\pi \cdot 1800}{60} \quad (43)$$

$$\omega_{motor} = 188,5 \text{ Rad/seg} \quad (44)$$

Relação de transmissão das polias sendo:

$$i = \frac{D_{motor}}{D_{eixo}} \quad (45)$$

$$i = \frac{55}{50} \quad (46)$$

$$i = 1,1 \quad (47)$$

A relação de Transmissão pode também ser descrita como:

$$i = \frac{\omega_{motor}}{\omega_{eixo}} \quad (48)$$

Logo:

$$\omega_{eixo} = i \cdot \omega_{motor} \quad (49)$$

$$\omega_{eixo} = 1,1 \cdot \omega_{motor} \quad (50)$$

Como o valor da velocidade do motor foi encontrado anteriormente, é possível completar a equação, da forma:

$$\omega_{eixo} = 1,1 \cdot 188,5 \quad (51)$$

$$\omega_{eixo} = 207,35 \text{ rad/s} \quad (52)$$

Torque no eixo:

O torque do eixo dos volantes é dado por:

$$T_{eixo} = \frac{T_{motor}}{i} \quad (53)$$

O torque do motor é dado por:

$$T_{motor} = \frac{P}{\omega_{motor}} = \frac{735,5}{188,5} = 3,9 \text{ N.m} \quad (54)$$

Logo:

$$T_{eixo} = \frac{3,9}{1,1} = 3,54 \text{ N.m} \quad (55)$$

Energia Cinética Total dos Volantes:

A energia cinética total dos volantes é dada por:

$$K_{final} = \frac{1}{2} \cdot (I_1 + I_2) \cdot \omega_f^2 \quad (56)$$

$$K_{final} = \frac{1}{2} \cdot (0,0777 + 0,0516) \cdot (207,35)^2 \quad (57)$$

$$K_{final} = 2779,56 \text{ J} \quad (58)$$

4.2.2 Freio a Disco

Foi-se utilizado as dimensões e medidas do disco e pastilha de freios selecionados, sendo eles de um veículo UNO MILLE.

Para o calculo do torque de frenagem, utilizou-se a equação:

$$T = \frac{1}{2} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot f \cdot \rho_a \cdot r_i \cdot (r_o^2 - r_i^2) \quad (59)$$

Em que:

- $(\theta_2 - \theta_1)$: Ângulo de contato da pastilha em radianos, no valor de 60° (1,05 rad)
- f = Coeficiente de Atrito, adotando o valor de 0,4
- ρ_a = Pressão normal aplicada a pastilha, cujo valor usual médio varia de 2Mpa a 8Mpa segundo Gillespie (1992), adotando o valor de 2Mpa.
- r_i = Raio Interno da pastilha de freio: 70mm (0,07m)
- r_o = Raio Externo da pastilha de freio: 120mm (0,12m)

Dessa forma, a equação torna-se:

$$T = \frac{1}{2} \cdot (1,05) \cdot 0,4 \cdot [2Mpa] \cdot 0,07 \cdot (0,12^2 - 0,07^2) \quad (60)$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot (1,05) \cdot 0,4 \cdot [2Mpa] \cdot 0,07 \cdot (0,0095) \quad (61)$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot (1,05) \cdot 0,4 \cdot [2Mpa] \cdot 0,000665 \quad (62)$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot [2Mpa] \cdot 0,0002793 \quad (63)$$

$$T = 279,3 \text{ N.m} \quad (64)$$

4.2.3 Transmissão de potência

Tipo de Correia: Para a bancada didática, foi selecionado a correia Trapezoidal devido a sua eficiência na transmissão de potência, sua longa vida útil e baixo desgaste, conseqüentemente, requerendo menos manutenções e trocas.

Neste tipo de correia, sua seção transeversal trapezoidal permite um maior contato com as polias, resultando em melhor aderência da correia, o que reduz o risco de deslizamento.

Ademais, a escolha também se justifica pelo fato que este tipo de correia é capaz de transmitir forças sem precisar de muita tensão inicial.

Pré-carga: A correia trapezoidal estará montada em três polias, a primeira delas a polia motora do motor elétrico, uma polia tensora, e a polia escalonada fixa ao eixo árvore, que transmitirá energia ao sistema.

Desta forma, tem-se:

- Potência do motor (P): 735,5 W
- Rotação do motor (N): 1.800 RPM
- Polia motora (d1): 55 mm ($r_1 = 0,0275$ m)
- Polia tensora (d2): 55 mm ($r_2 = 0,0275$ m)
- Polia escalonada (d3): 50 mm ($r_3 = 0,0250$ m)
- Distâncias entre centros: C1–2: 180 mm (0,18 m) (polia motora para polia tensora)
- Distâncias entre centros: C2–3: 350 mm (0,35 m) (polia tensora para polia escalonada)
- Massa linear da correia (ρ): 1,2 kg/m (valor adotado)
- Coeficiente de atrito (μ): 0,25 (borracha/ferro fundido)

A velocidade periférica na correia (V) é dada por:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot (0,05) \cdot (1800)}{60} \quad (65)$$

$$V = 4,71 \text{ m/s} \quad (66)$$

Ângulo de abraçamento entre polia tensora e polia do eixo (θ_3):

$$\theta_3 = \pi - 2 \arcsen \left(\frac{r_2 - r_3}{C_{23}} \right) \quad (67)$$

$$\theta_3 = \pi - 2 \arcsen \left(\frac{0,0275 - 0,0250}{0,35} \right) \quad (68)$$

$$\theta_3 = 3,127 \text{ rad } (179,2^\circ) \quad (69)$$

Realizando o calculo do exponencial:

$$\exp(0,5123 \cdot \theta_3) \quad (70)$$

$$\exp(0,5123 \cdot 3,127) = \exp(1,60) = 4,9 \quad (71)$$

A força centrífuga F_c é dada pela seguinte equação, em que K_c é tabelado no valor de: 0,561.

$$F_c = K_c \cdot \left(\frac{V}{2,4} \right)^2 \quad (72)$$

$$F_c = 0,516 \cdot \left(\frac{4,17}{2,4} \right)^2 \quad (73)$$

$$F_c = 2,15N \quad (74)$$

O cálculo de ΔF é dado pela seguinte equação, em que os valores das respectivas variáveis H_d (882,6W) e N_d (3), são obtidos através das tabelas:

$$\Delta F = \frac{H_d/N_d}{\pi n d} \quad (75)$$

$$\Delta F = \frac{882,6/3}{\pi \left(\frac{1800}{60} \right) 0,05} \quad (76)$$

$$\Delta F = \frac{294,2}{4,71} = 62,46N \quad (77)$$

A força F_1 se da por:

$$F_1 = F_c + \frac{\Delta F (\exp\theta)}{(\exp\theta)-1} \quad (78)$$

$$F_1 = 2,15 + \frac{62,46 \cdot 4,9}{3,9} \quad (79)$$

$$F_1 = 80,6N \quad (80)$$

Calculando F_2 :

$$F_2 = F_1 - \Delta F \quad (81)$$

$$F_2 = 80,6 - 62,46 \quad (82)$$

$$F_2 = 18,16N \quad (83)$$

Calcula-se então a força de pré-carga F_i :

$$F_i = \frac{F_1 + F_2}{2} - F_c \quad (84)$$

$$F_i = \frac{80,6 + 18,16}{2} - 2,15 \quad (85)$$

$$F_i = 49,38 - 2,15 \quad (86)$$

$$F_i = 47,2N \quad (87)$$

4.2.4 Tabelas de valores

A seguir, estão apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7, os elementos mecânicos com seus respectivos valores de interesse obtidos pelos cálculos estruturais:

Volante de Inercia:

Tabela 5 - Volante de Inercia

Parâmetro	Valor
Momento de Inércia	$I_{Total} = 0,1295 \text{ kg/m}^2$
Velocidade Angular	$\omega_f = 207,35 \text{ rad/s}$
Energia Cinética Total	$K_{final} = 2779,56 \text{ J}$

Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Freio a Disco:

Tabela 6 - Freio a Disco

Parâmetro	Valor
Torque de Frenagem	$T = 279,3 \text{ N.m}$

Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Transmissão de Potência:

Tabela 7 - Transmissão de Potência

Parâmetro	Valor
Tipo de Correia	Trapezoidal
Pré-Carga	47,2N

Fonte: Pesquisa Direta (2024)

4.3 Modelagem 3D

4.3.1 Volantes de Inercia

A Figura 19 representa o modelamento do Volante de Inércia 1 de massa 7,4kg. Seu desenho técnico com as suas dimensões correspondentes está apresentado na Figura 20:



Figura 19 - Volante 1
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

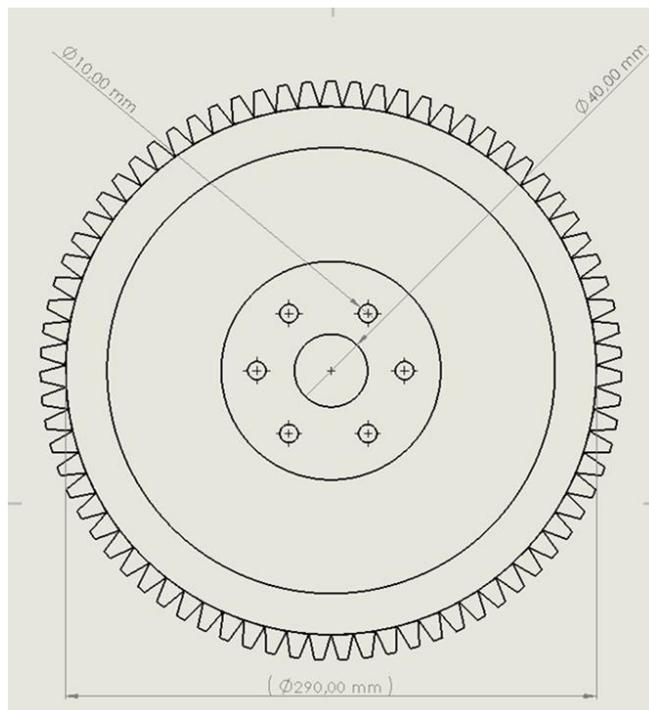


Figura 20 - Desenho Técnico Volante 1
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

O Volante 2 de massa 6,6kg está representado na Figura 21, assim como seu desenho técnico demonstrado na Figura 22:



Figura 21 - Volante 2
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

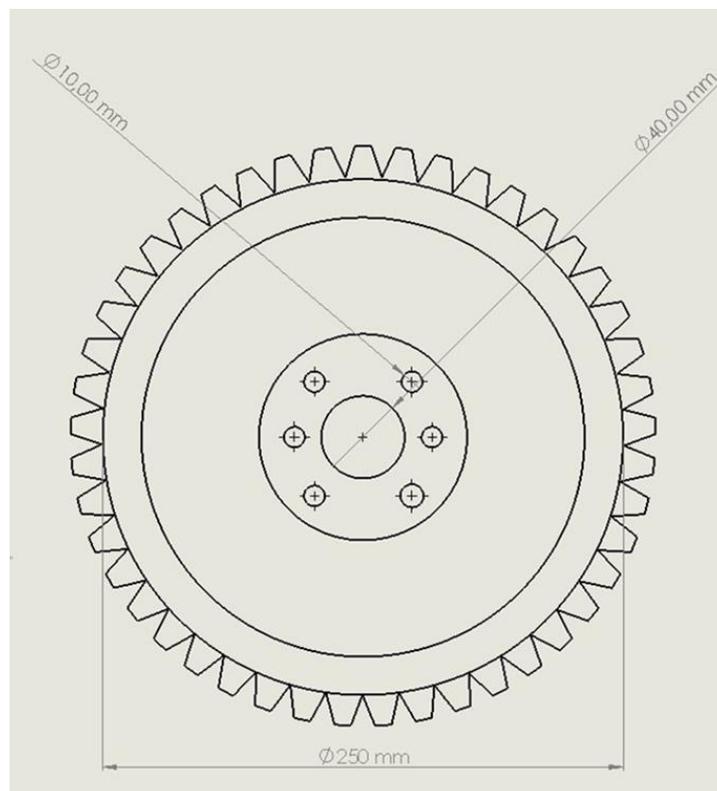


Figura 22 - Desenho Técnico Volante 2
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Para o projeto, o elemento de fixação escolhido para ambos os volantes no eixo árvore principal foi o anel de expansão, pela sua disponibilidade no mercado, distribuição equilibrada de carga e facilidade de montagem e desmontagem. A Figura 23 demonstra o Volante 2 acoplado ao eixo árvore por um anel de expansão:

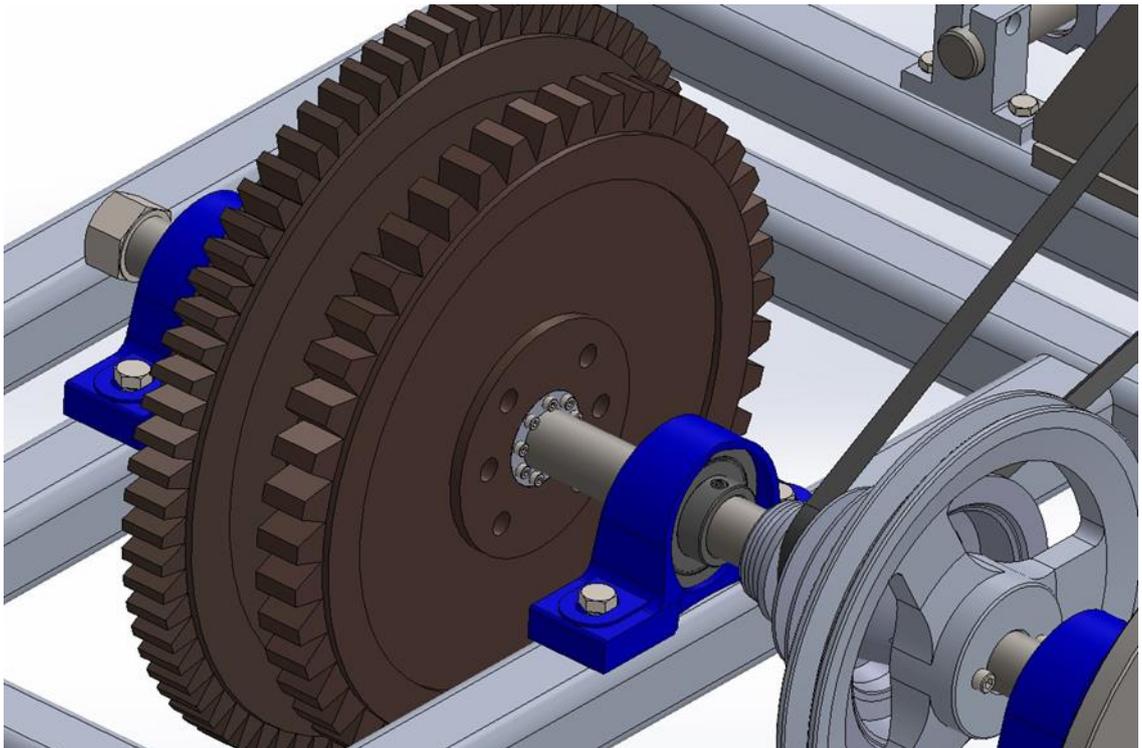


Figura 23 - Anel de Expansão
Fonte:Pesquisa Direta (2024)

4.3.2 Mancais de rolamento

Serão três mancais de rolamento que irão fixar o eixo árvore na bancada, garantindo sua segura sustentação. Cada um dos mancais por sua vez, estarão fixos a estrutura da bancada por meio de dois parafusos rosqueados de 8 milímetros, sendo este seu elemento de fixação escolhido, tanto por praticidade e disponibilidade destes materiais, quanto pela segurança que eles fornecem. Os mancais são demonstrados na Figura 24, sua montagem com os parafusos na Figura 25, assim como seu desenho técnico na Figura 26:

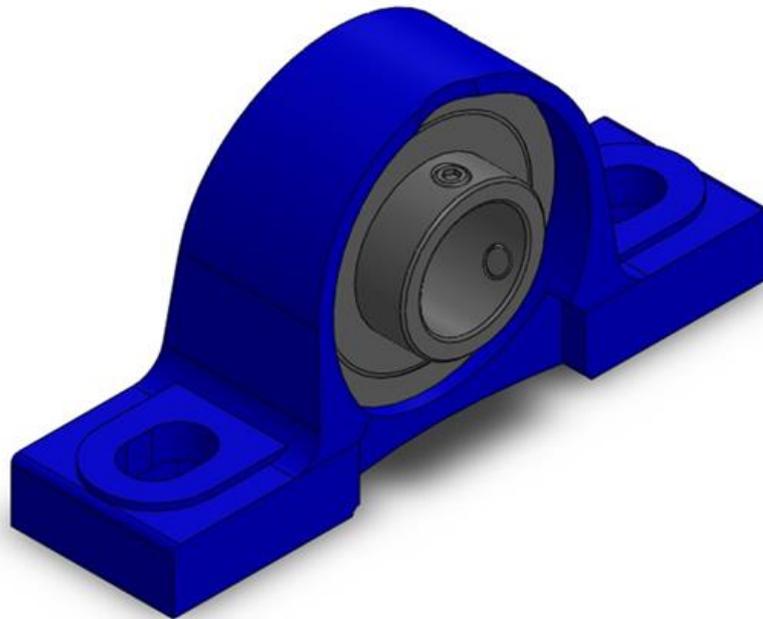


Figura 24 - Mancais de Rolamento
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

4.3.3 Eixo Árvore

O eixo árvore, ao qual serão acoplados os volantes de inércia, a polia e o freio a disco, será um eixo de Aço Carbono com 25 milímetros de diâmetro. Seu desenho técnico está demonstrado na Figura 27:

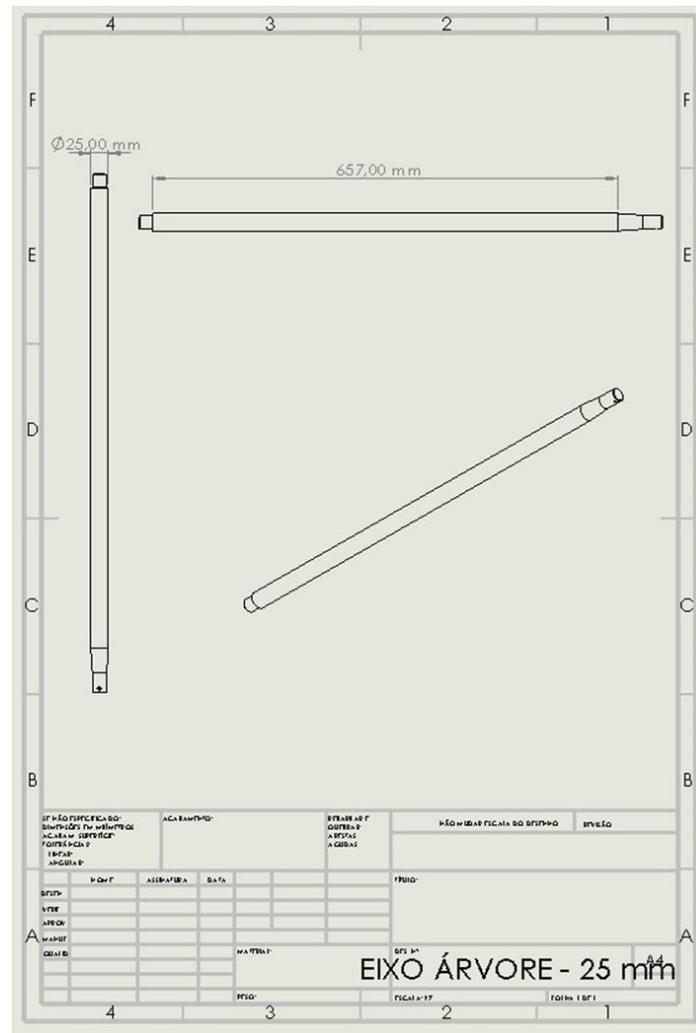


Figura 27 - Eixo árvore
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

4.3.4 Polia Escalonada

A polia selecionada para o projeto foi uma polia escalonada já de posse do professor responsável pela disciplina de Elementos de Máquinas. O fato de ser uma polia escalonada é crucial para o propósito de estudo da bancada, pois os diferentes diâmetros em que a correia de transmissão ligada ao motor pode ser acoplada para a transmissão de potência ao eixo, permite o estudo e análise de diferentes velocidades de rotação do sistema, a depender do diâmetro a qual a correia está ligada. Ao se alterar o diâmetro da polia escalonada a qual a correia se liga,

altera-se a relação de transmissão do sistema, permitindo que o sistema opere em diferentes velocidades. Seu modelamento está demonstrado na Figura 28, assim como seu desenho técnico demonstrado na Figura 29:

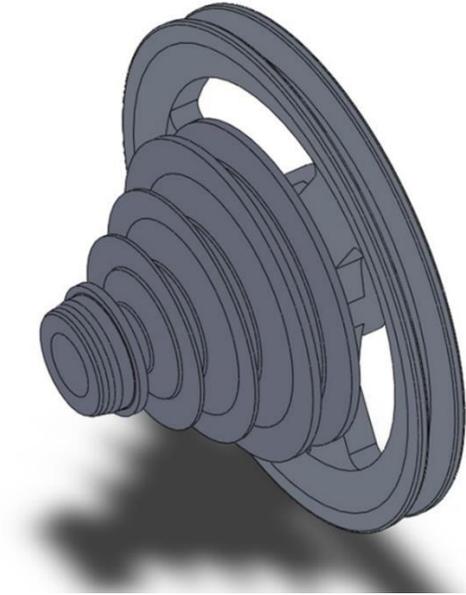


Figura 28 - Polia Escalonada
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

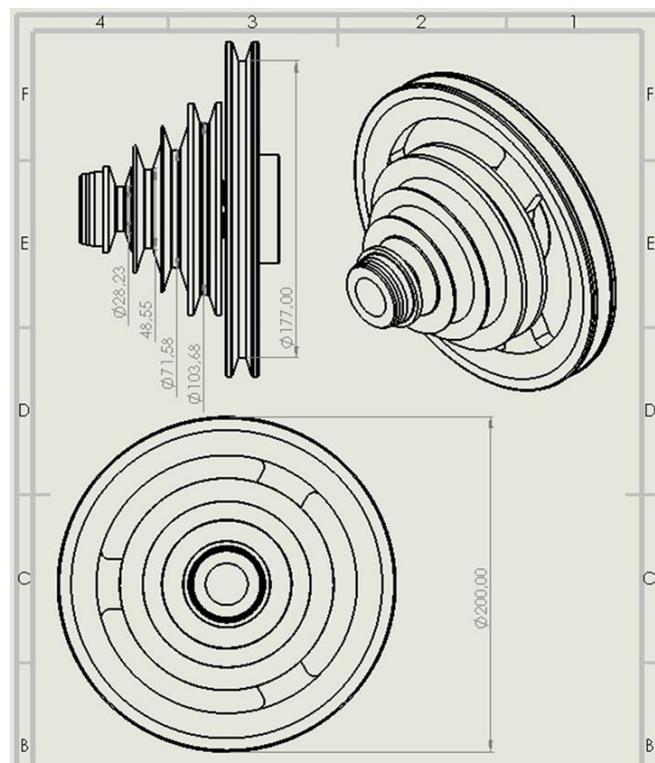


Figura 29 - Desenho Técnico Polia
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

4.3.5 Motor Elétrico

Foi selecionado um motor elétrico de um cavalo de potência (1CV), potência suficiente para fornecer energia ao sistema. Como um dos focos de estudo da bancada é o estudo da pré-carga e tensão na correia, o motor elétrico terá uma base de sustentação móvel, que permitirá seu movimento ao longo do Eixo Z, se aproximando e se afastando do eixo e da polia. Tal escolha de projeto irá permitir o estudo de diferentes tensões na correia de transmissão. Seu modelamento com vista isométrica está representado na Figura 30, assim como sua vista superior na Figura 31 e sua vista lateral na Figura 32:

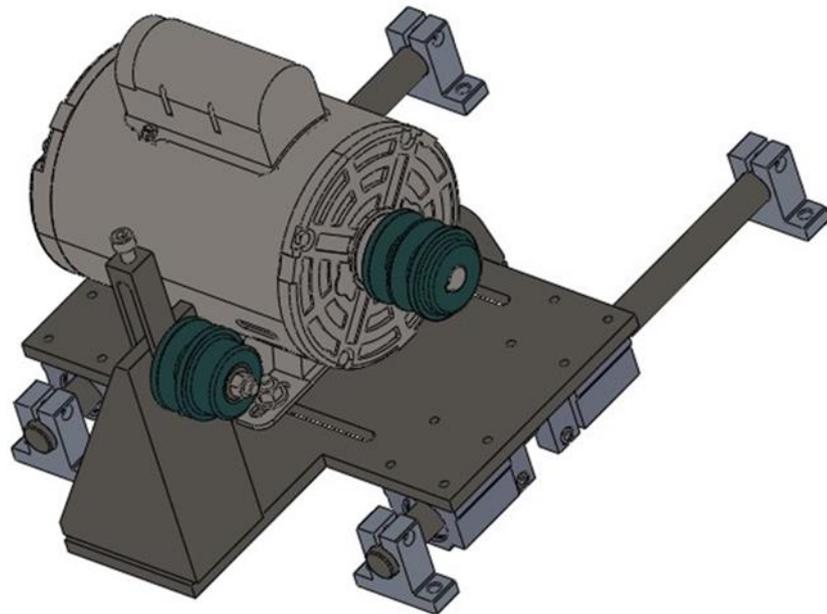


Figura 30 - Motor Elétrico Vista Isométrica
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

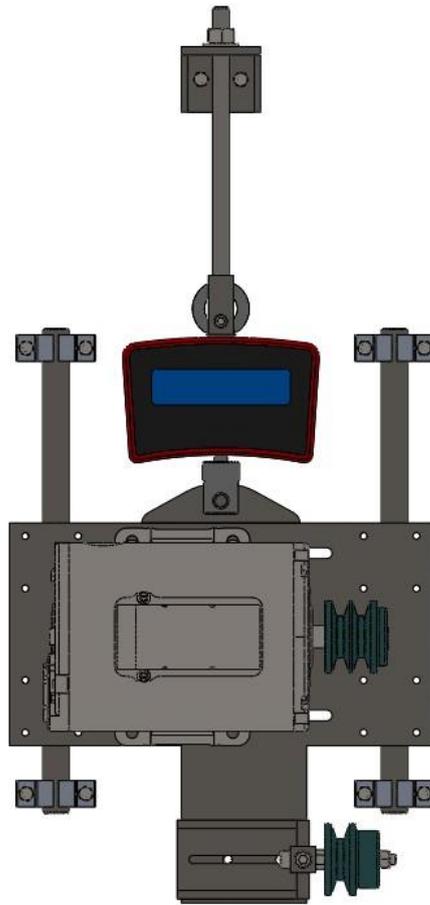


Figura 31 - Motor Eléctrico Vista Superior
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

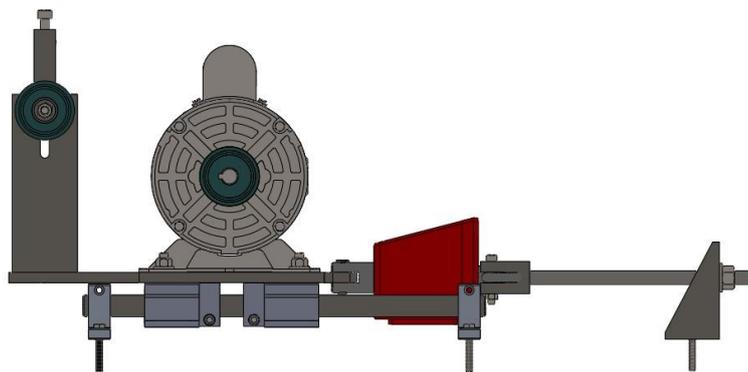


Figura 32 - Motor Eléctrico Vista Lateral
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

4.3.6 Dinamômetro

O dinamômetro, instrumento de coleta dos dados a serem estudados com a bancada, foi selecionado por questões práticas e de disponibilidade. Apesar de haverem outros meios de coleta e estudo dos dados em questão, o professor da disciplina Elementos de Máquina já possui um dinamômetro.

Como a disponibilidade é de apenas um dinamômetro, a bancada foi pensada para que a mesma consiga apoiar e suportar o posicionamento da mesma em dois pontos distintos. Uma delas ligada a base do motor elétrico, para o estudo da pré-carga e tensão na correia, e outro ligado ao dispositivo de acionamento do freio a disco. Seu modelamento está demonstrado na Figura 33:



Figura 33 - Dinamômetro
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

4.3.7 Freio a Disco

Assim como os volantes de inercia, o freio a disco foi selecionado em uma oficina mecânica, sem custos, já que o mesmo estava para descarte. Esse freio originalmente pertence á um FIAT UNO MILLE, de ano desconhecido. Seu modelo está representado na Figura 34, assim como seu desenho técnico na Figura 35:



Figura 34 - Freio a Disco
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

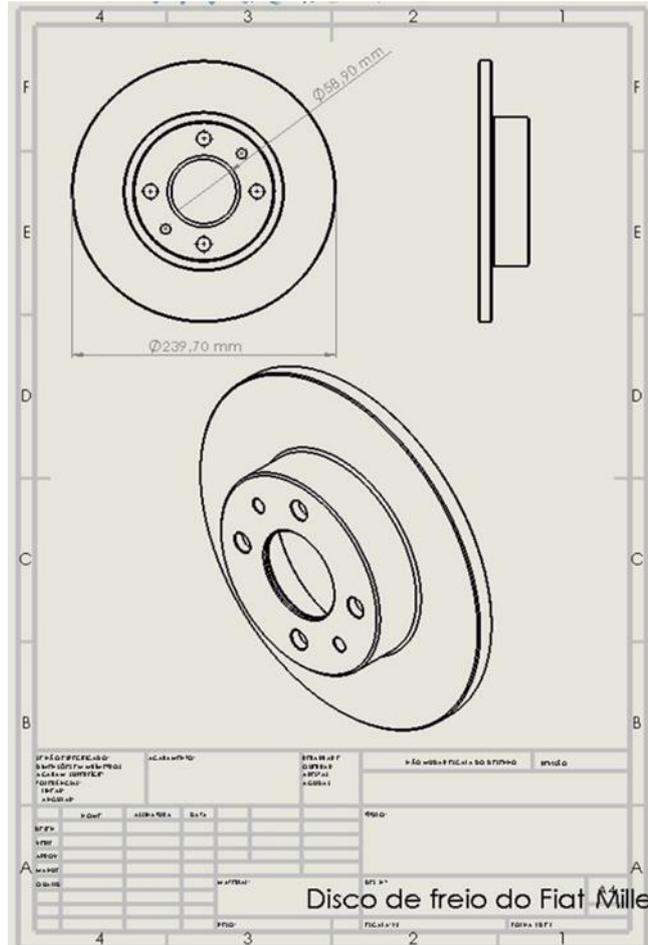


Figura 35 - Desenho Técnico Freio a Disco
 Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Quanto a sua fixação ao eixo e ao sistema, para o projeto, foi-se escolhido usar um cubo de roda, devido a segurança de fixação e também a disponibilidade dessa peça referente a este modelo de automóvel no mercado. O cubo de roda foi adquirido na mesma oficina mecânica em que foi obtido o disco de freio, como mostra a Figura 36:



Figura 36 - Cubo
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

O cubo também foi devidamente projetado no Solidworks, com suas respectivas dimensões de acordo com o modelo real, como está representado pelas Figuras 37 e 38:

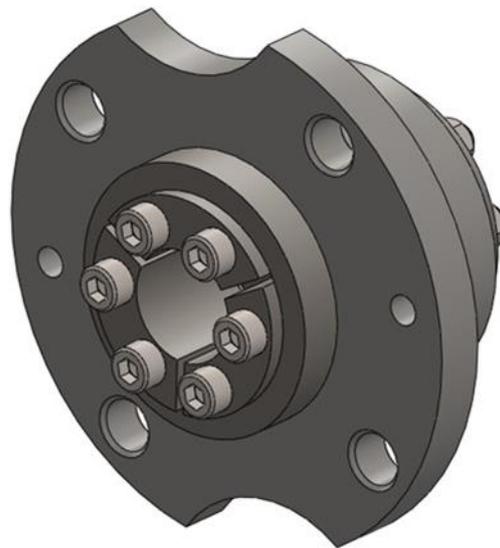


Figura 37 - Modelagem do Cubo
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

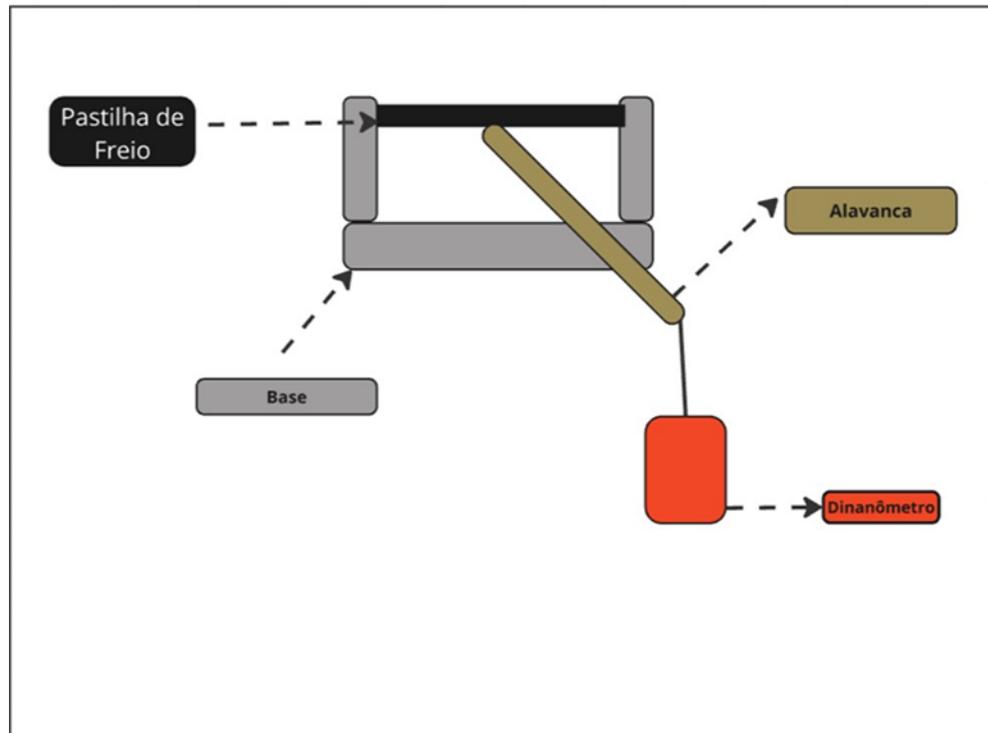


Figura 39 - Diagrama do acionador da pastilha de freio
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Ao se aplicar força sobre a alavanca, que também estará montada sobre a base da pastilha de freio, ela irá rotacionar, empurrando a pastilha de freio em direção ao disco de freio.

A base, conforme dito anteriormente, também será de tubos de Metalon pelos mesmos motivos da bancada, seu baixo custo e resistência mecânica. Seu projeto está representado na Figura 40, assim como seu desenho Técnico na Figura 41:

Os rasgos nos tubos que sustentarão a pastilha, conforme o desenho, serão de 27 milímetros, mesma medida da largura da pastilha de freio. A Figura 43 representa a base com a pastilha e a alavanca posicionadas, assim como o seu desenho técnico na Figura 44:

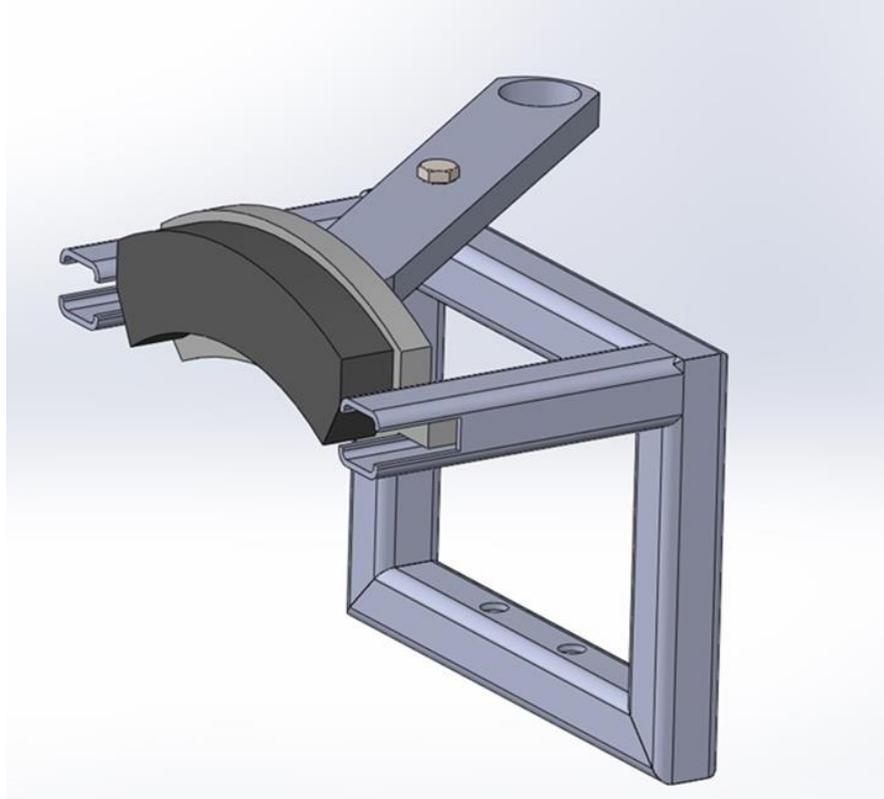


Figura 43 - Montagem Base, Pastilha de Freio e Alavanca
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

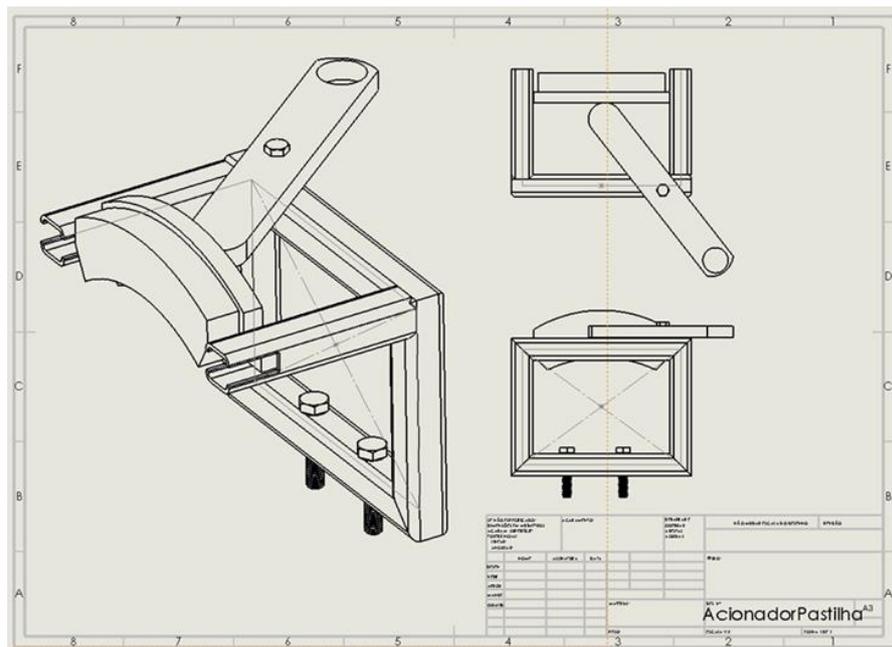


Figura 44 - Desenho Técnico da Base
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

4.3.9 Bancada de Metalon

A bancada em si, todos seus elementos, será montada em uma base de Metalon, sendo essa estruturalmente feita de tubos 40x40 milímetros. A escolha do material da bancada como sendo de Metalon se deve a vários motivos, sendo eles o custo benefício, pois é um material acessível, de fácil manuseio e manutenção, sua alta resistência mecânica, durabilidade e leveza. Sua vista Isométrica é demonstrada na Figura 47:



Figura 47 - Bancada Vista Isométrica
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

O projeto da bancada de Metalon final é dividido em dois módulos, o primeiro suportará o eixo árvore e seus elementos, e o segundo irá suportar o motor elétrico. Toda sua estrutura é feita de tubos de Metalon 40x40 milímetros, sendo feito em alguns tubos furações de 8 milímetros de diâmetro (Fixação dos mancais de rolamento) e de 6 milímetros (Fixação do motor elétrico). O espaçamento entre os tubos transversais a estrutura, aqueles que suportarão o eixo árvore, foi dimensionada de acordo com o espaçamento requerido pelos elementos do eixo principal. Sua vista superior está apresentada na Figura 48:

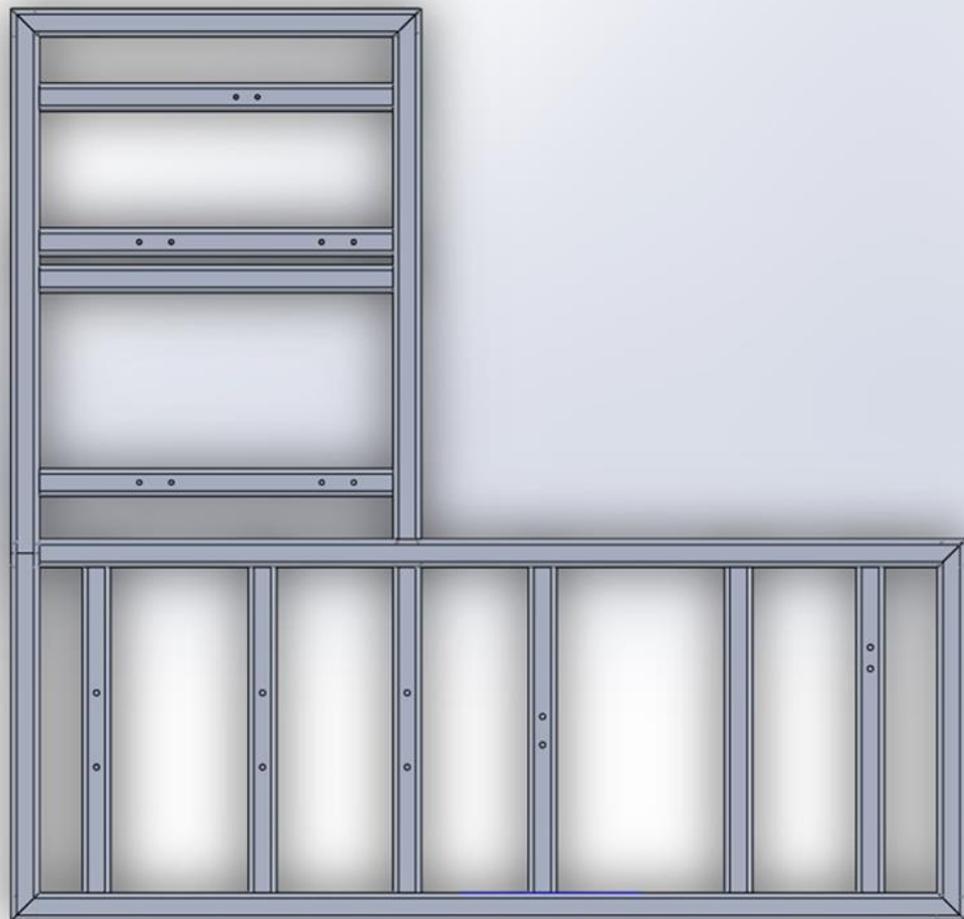


Figura 48 - Bancada Vista Superior
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Em seguida os mancais de rolamento foram fixados à estrutura da bancada, para que o eixo pudesse ser acoplado, conforme a Figura 52:

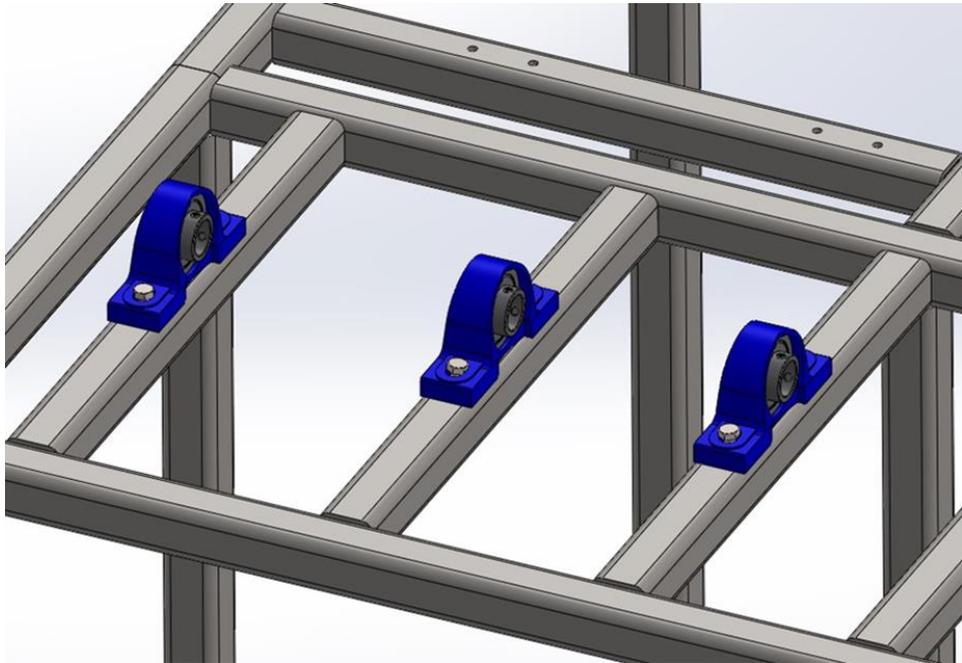


Figura 52 - Bancada e Mancais
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Dessa forma, foi possível acoplar o eixo ao sistema, conforme a figura 53:

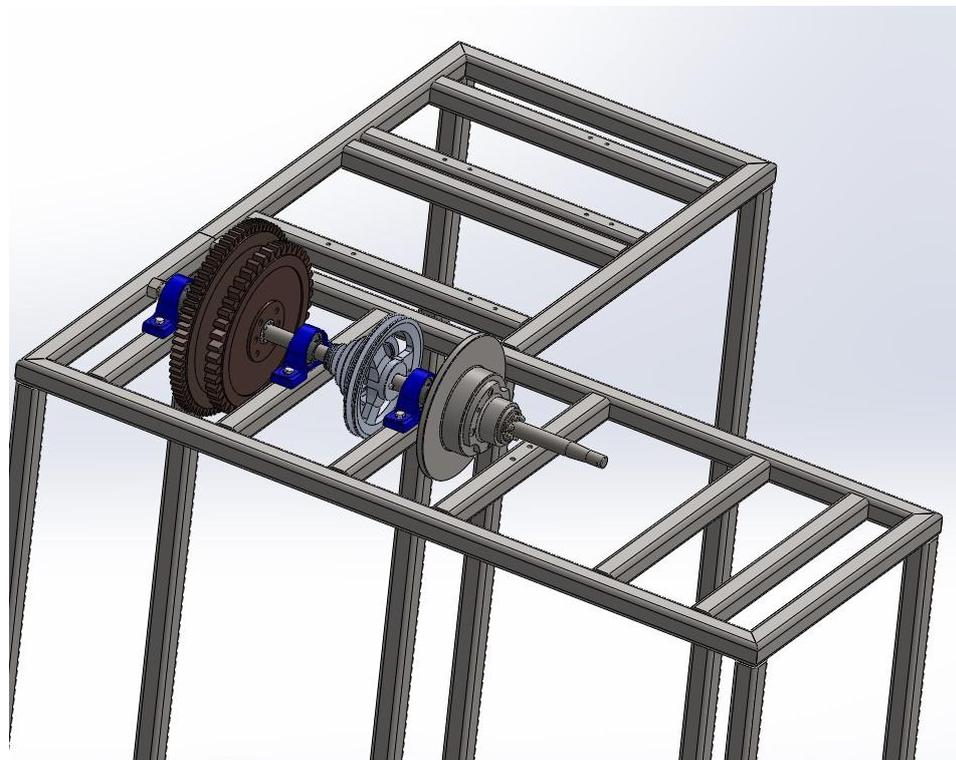


Figura 53 - Eixo montado na Bancada
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Em seguida, foi adicionado a montagem o motor elétrico e a correia para transmissão de potência, conforme mostra a Figura 54:

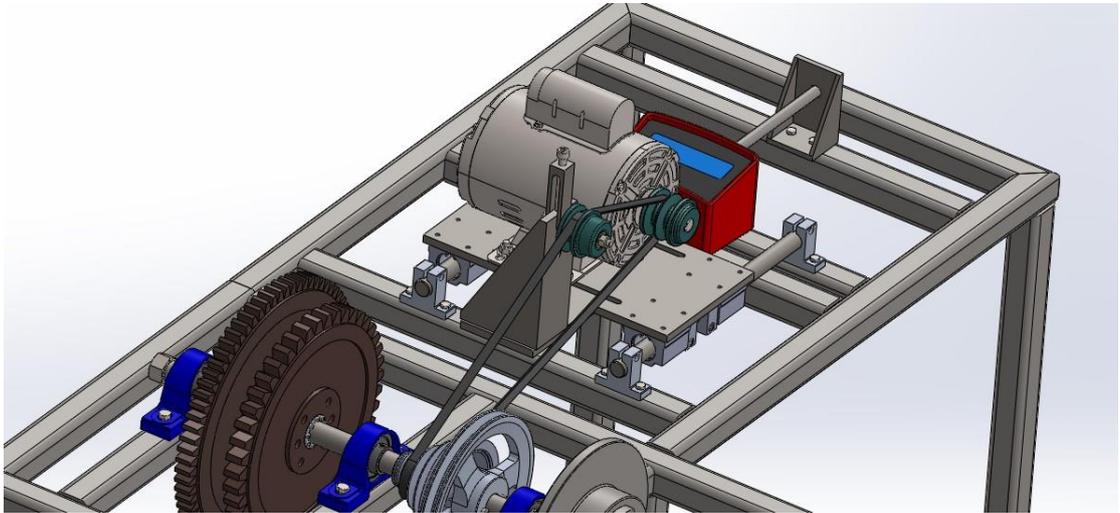


Figura 54 - Motor Elétrico e Correia
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Por fim, foi adicionado o mecanismo de acionamento da pastilha de freio, conforme a Figura 55:

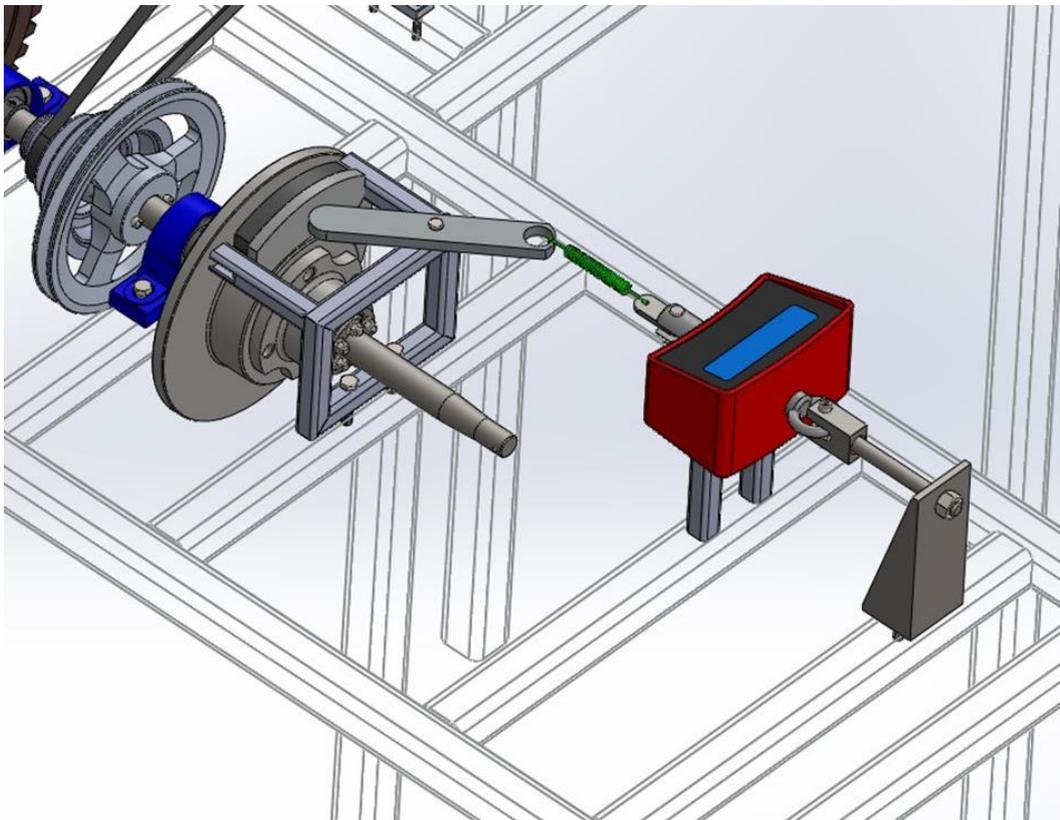


Figura 55 - Acionador da pastilha de freio
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

4.4 Montagem final

A figura 56 demonstra a vista isométrica do projeto:

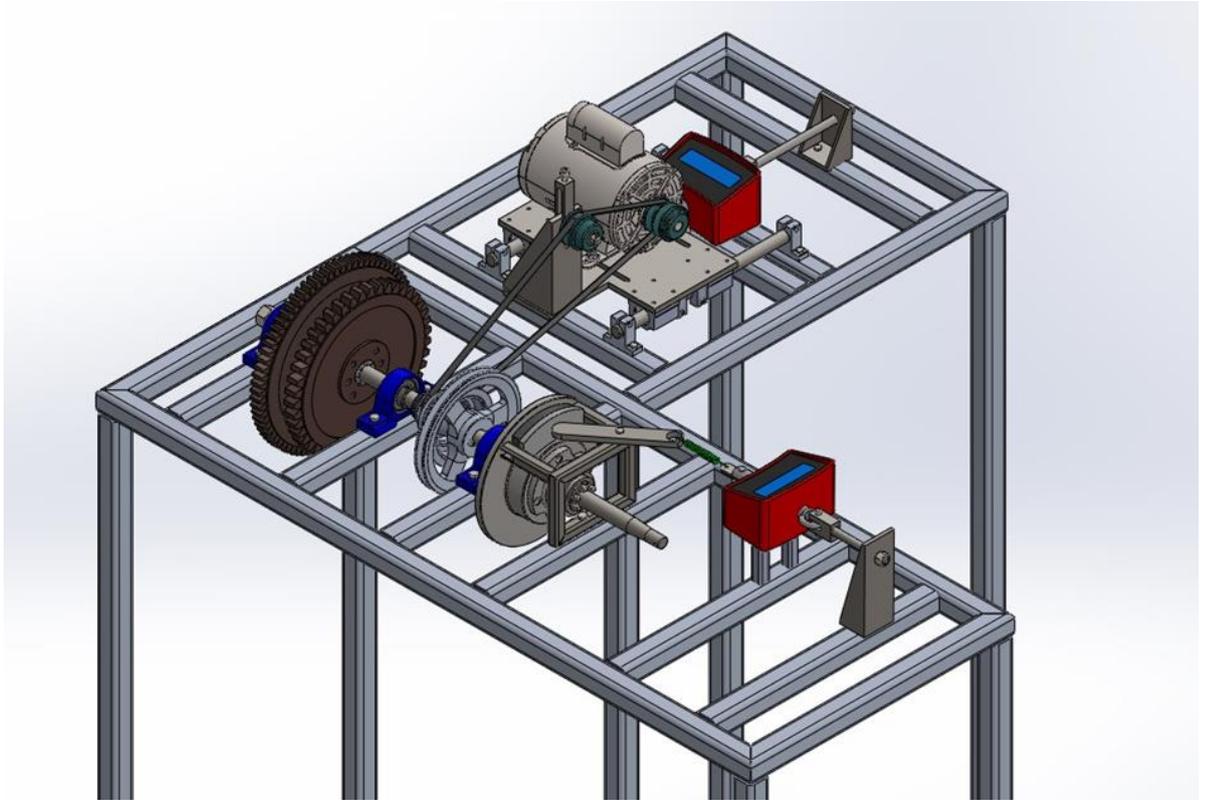


Figura 56 - Montagem Final Vista Isométrica
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Sua vista superior está demonstrada na Figura 57:

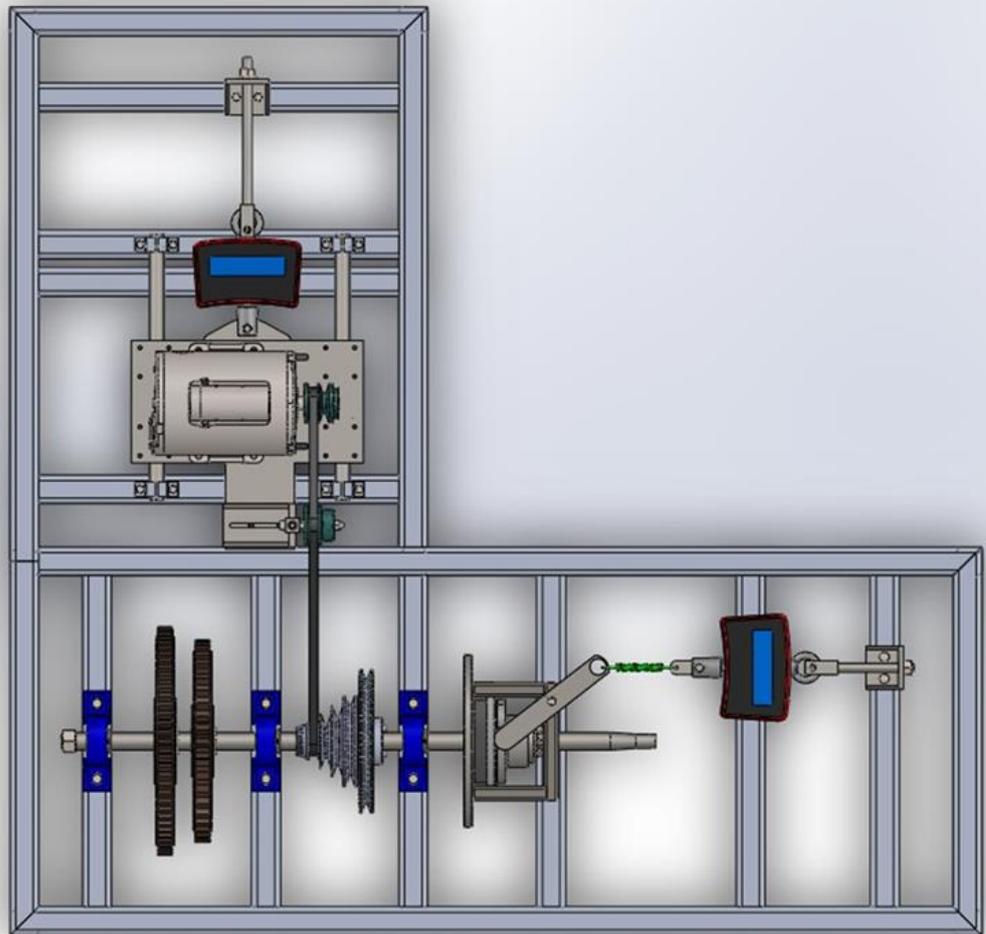


Figura 57 - Montagem Final Vista Superior
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Quanto ao fator de segurança, uma gaiola foi adicionada em frente ao motor elétrico, para garantir que durante do funcionamento, o operador não tenha um contato direto com a correia, evitando possíveis acidentes de manuseio. As figuras 58 e 59 demonstram o posicionamento da gaiola de segurança:

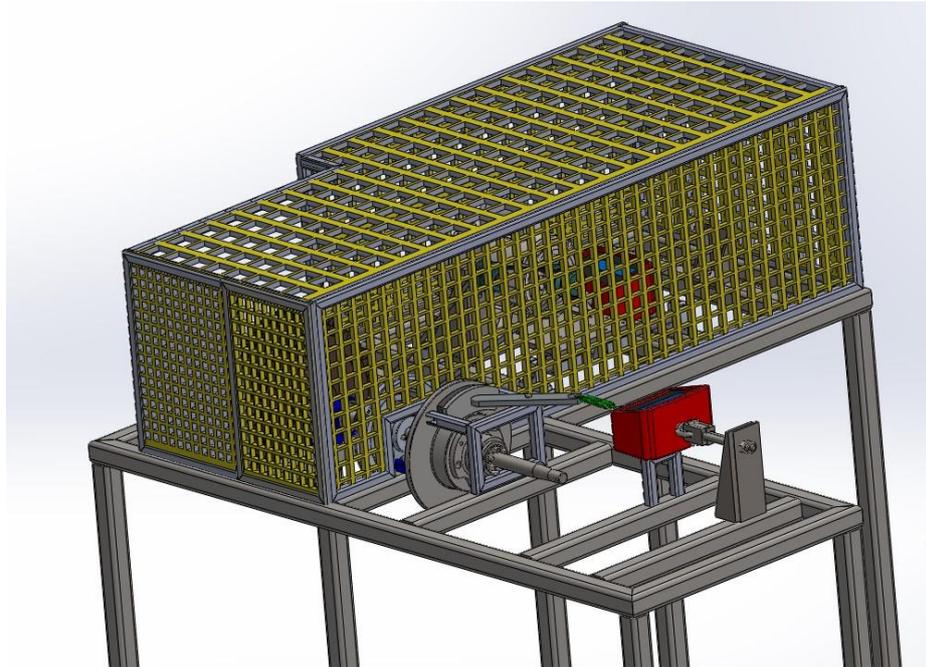


Figura 58 - Gaiola de Segurança
Fonte: Pesquisa Direta (2025)

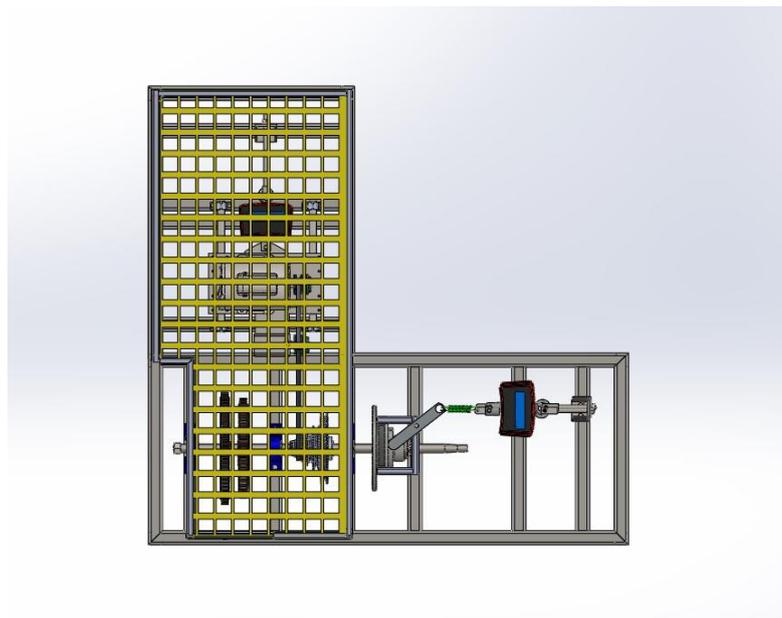


Figura 59 - Gaiola de Segurança Vista Superior
Fonte: Pesquisa Direta (2025)

Sendo assim, a bancada didática servirá em aulas práticas, relacionando conhecimentos da sala de aula como planejamento e projeto mecânico, momento de inércia e velocidade angular de um sistema, torque e forças de frenagem, transmissão de potência e seleção de tipos de correia.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

A revisão bibliográfica serviu como base para a compreensão aprofundada dos princípios de um projeto mecânico, parâmetros e variáveis dos elementos selecionados, definindo o interesse de estudo de cada um dos elementos, além de dados técnicos essenciais para a realização de cálculos, análise estrutural e seleção de materiais, garantindo que a montagem e concepção do modelo proposto funcione corretamente e atinja o objetivo primário de ser usada em aulas de laboratório.

A escolha dos materiais que compõe a bancada foi feita baseando-se em funcionalidade, compatibilidade e durabilidade, além de fatores importantes como disponibilidade e preço comercial, levando a escolhas como o uso de anel de expansão para os volantes de inércia devidos a sua fácil aquisição e baixo custo, e também na seleção de componentes importantes como o volante de inércia e o freio a disco em oficinas mecânicas e locais de descarte. Isso fez com que a idealização do projeto sofresse mudanças, como no caso de se adicionar dois volantes de inércia ao invés de um só, como na idealização original.

Quanto aos elementos e seus parâmetros técnicos, o dimensionamento das peças para o modelamento foi realizado a partir das dimensões reais dos componentes, considerando as especificações do sistema quanto a seu funcionamento e segurança. Os cálculos estruturais realizados forneceram os valores referentes ao momento de inércia dos volantes, como sendo de $0,1295 \text{ kg/m}^2$, sua aceleração angular de $207,35 \text{ rad/s}$ e energia cinética total no valor de $2779,56 \text{ J}$. Quanto ao freio, foi encontrado o torque de frenagem de $279,3 \text{ N.m}$ e uma pré-carga inicial para a correia de transmissão de $47,2 \text{ N}$.

A modelagem 3D utilizando o SolidWorks permitiu, por sua vez, a visualização da montagem completa da bancada, demonstrando o posicionamento correto de cada componente, sendo que a disposição e dimensão da bancada levou em conta fatores como acessibilidade e manuseio dos equipamentos tanto pelo professor, quanto pelos alunos.

Com isso, o projeto da bancada didática possibilitará o estudo e análise em aulas práticas de laboratório, os elementos mecânicos principais e seu funcionamento num sistema mecânico, diferentes configurações de velocidade do eixo serão possíveis graças à polia escalonada, possibilitando a análise e estudo de diferentes momentos de inércia e velocidade angular do eixo, torque e força de acionamento da pastilha de freio dependendo da configuração selecionada, assim como os valores de pré-carga e tensão inicial da correia em cada montagem.

Ademais, a bancada de maneira geral demonstrará um sistema mecânico em funcionamento, a importância do planejamento mecânico e da montagem num projeto, a fim de se garantir os resultados esperados.

5.2 Recomendações

A partir deste trabalho, será possível a construção de fato da bancada didática em trabalhos futuros, recomendando-se as seguintes propostas de trabalhos a serem realizados:

- Analisar a viabilidade de processos com usinagem para obtenção de algumas peças como o eixo árvore e a base de suporte da pastilha.
- Realizar estudo de vibrações do sistema, a fim de se garantir maior estabilidade e segurança nas operações.
- Determinar possíveis alterações, se necessárias, ao design do projeto e seus posicionamentos, buscando otimizar sua eficiência.
- Averiguar economicamente se a escolha de alguns materiais selecionados como o uso do Metalon para a estrutura da bancada é de fato o ideal.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PETERSON, Kay; DECATO, Lisa; KOLB, David A. Moving and learning: Expanding style and increasing flexibility. **Journal of Experiential Education**, v. 38, n. 3, p. 228-244, 2015.

PEKELMAN, Helio; MELLO-JR, A. A importância dos laboratórios no ensino de engenharia mecânica. In: **Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia-COBENGE**. Brasília, 2004.

COLLINS, Jack. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas** – Uma perspectiva de prevenção da falha. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

ALMEIDA, Julio César de.; LIMA, Key. Fonseca de.; BARBIERI, Renato. **Elementos de Máquinas – Projeto de Sistemas Mecânicos**. 2ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2022.

SHIGLEY, Joseph Edward. Elementos de Máquinas, vol. 1 e 2. **Rio de Janeiro: LTC Editora**, 1984.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. bookman editora, 2013.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETH, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição**. McGraw Hill Brasil, 2016.

ENGELMANN, Frank; GROTE, Karl-Heinrich; GUTHMANN, Thomas. Machine Elements. **Springer Handbook of Mechanical Engineering**, p. 503-628, 2021.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, M. de A. Fundamentos de metodologia científica. 5. reimp. **São Paulo: Atlas**, v. 310, 2007.

GIL, Antonio Carlos; VERGARA, Sylvia Constant. Tipo de pesquisa. **Universidade Federal de Pelotas. Rio Grande do Sul**, v. 31, 2015.

KÖCHE, José Carlos. **Fundamentos de metodologia científica** [em linha]. 2016

EDWARD, Norrie S. The role of laboratory work in engineering education: student and staff perceptions. **International Journal of Electrical Engineering Education**, v. 39, n. 1, p. 11-19, 2002

POCHE, Pedro Cauduro. **Desenvolvimento de uma bancada de testes de freios com torque de frenagem de até 400Nm**. 2023

PINTO, Rafael Lucas Machado et al. Análise comparativa do efeito térmico e do desgaste sofrido por um material de fricção de freio a disco submetido a ensaios em bancada Krauss com variações de potência motora e condições operacionais. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, p. e-12809, 2020.

ZANON, Giulia Caroline. **Projeto de um dinamômetro inercial para teste de freios em veículos de pequeno porte**. 2019.

FLEGLER, Lucas Aguilar. **Projeto mecânico de um dinamômetro inercial para análise do veículo de alta eficiência energética da equipe UTECO**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CAIXETA, Luiz Gustavo da Rocha. **Projeto de dinamômetro inercial automatizado para analisar o comportamento em desgaste de sistemas de freio de veículos leves**. 2017.

ALVES, Clarice Rodrigues de Oliveira et al. **Análise dos mecanismos de freio desgaste das pastilhas de freio em ensaio de bancada**. 2023.

DE QUEIROZ ARAUJO, Carlos Filipe. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE BANCADA DE ENSAIOS PARA ESTUDO DE SISTEMAS DE FREIO DE BICICLETAS (I)**.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: SAE International, 1992.

ANEXO