

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**PROJETO DE BEQUILHA DE AERODESIGN – ASPECTOS
DE DESIGN E SELEÇÃO DE MATERIAIS**

ELAINE DE JESUS CAMELO

SÃO CARLOS -SP
2025

PROJETO DE BEQUILHA DE AERODESIGN – ASPECTOS DE DESIGN E SELEÇÃO DE MATERIAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Rovere

São Carlos-SP
2025



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Elaine de Jesus Camelo

RA: 769665

TÍTULO: Projeto de bequilha de aerodesign - aspectos de design e seleção de materiais

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Carlos Alberto Della Rovere

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 14/02/2025, 11h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Carlos Alberto Della Rovere	10	10
Prof. Dr. Arthur de Bribean Guerra	9	10
Média	9,5	10

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Carlos Alberto Della Rovere

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS ALBERTO DELLA ROVERE
Data: 18/02/2025 17:19:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Arthur de Bribean Guerra

Documento assinado digitalmente
gov.br ARTHUR DE BRIBEAN GUERRA
Data: 18/02/2025 17:35:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DEDICATÓRIA

In memoriam a Joana Ana de Jesus, vovó carinhosa.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus pela sua imensa misericórdia em me sustentar até aqui. Agradeço a minha família por sempre me apoiar e me ajudar em todas as coisas, a minha mãe Maria Gislaine de Jesus Camelo, ao meu pai Eli Ribeiro Camelo à minha irmã Erica de Jesus Camelo, aos meus irmãos Claudio Luís Floquet Junior e Carlos Eduardo Araujo Goes, à minha avó Joana Ana de Jesus e ao meu tio Walter de Jesus.

Agradeço ao projeto de extensão Dragão Branco (DB) Aerodesign, não apenas pelos dados fornecidos, mas todos os momentos incríveis que pude viver no projeto e por todas as pessoas incríveis que pude conhecer. Um agradecimento especial à Pamela Borges, minha amiga que apresentou a DB para mim e também me motivou durante toda a confecção deste trabalho, agradeço também por todos os cafezinhos.

Agradeço a minha psicóloga Márcia, que foi fundamental para que eu conseguisse vencer os obstáculos que surgiram em meu caminho.

Agradeço por todos os momentos bons vividos na graduação e por todas as pessoas boas que cruzaram meu caminho.

O universo não possui limites geográficos. O universo é um evento.
Jontein Gaarder.

RESUMO

A competição SAE Brasil Aerodesign reúne equipes de diversas universidades do Brasil e do exterior para desenvolver e testar aeronaves não tripuladas radiocontroladas, seguindo as especificações do regulamento lançado anualmente. Entre as equipes participantes, a Dragão Branco (DB) Aerodesign representa a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Com o objetivo de aprofundar os conhecimentos em projeto estrutural, este trabalho desenvolveu o projeto conceitual da bequilha, tomando como base os dados da aeronave apresentada pela DB na competição de 2024. Foram comparados dois designs prismáticos de seção maciça - um circular e outro retangular – para seleção de materiais para as bequilhas, foi utilizado o método de Ashby e, posteriormente, o dimensionamento foi verificado através de análises de tensão pelo método de elementos finitos (MEF). Os resultados da seleção de materiais pelo método de Ashby utilizando rigidez e baixo custo como parâmetros de otimização mostraram que as ligas de alumínio são as melhores candidatas para a aplicação. Levando em conta as geometrias estudadas e a disponibilidade de materiais no mercado, a liga 2024-T4 foi escolhida para ambos os designs propostos. O design de seção transversal circular apresentou menor massa segundo o dimensionamento das estruturas. A AEF validou ambos os designs segundo o critério de falha de von Mises, indicando que são capazes de suportar as tensões impostas durante o pouso da aeronave, condição mais crítica para o componente, quando está sujeito a tensões mais elevadas. Este estudo contribui para o aprimoramento dos futuros projetos estruturais na área de Aerodesign, fornecendo diretrizes para o desenvolvimento de componentes.

Palavras-chave: Projeto. Bequilha. Aerodesign. Seleção de Materiais pelo método de Ashby. AEF.

RIEPILOGO

La competizione SAE Brasil Aerodesign riunisce team provenienti da diverse università brasiliane e straniere per sviluppare e testare velivoli senza pilota radiocomandati, seguendo le specifiche dei regolamenti pubblicati ogni anno. Tra i team partecipanti, Dragão Branco (DB) Aerodesign rappresenta l'Università Federale di São Carlos (UFSCar).

Con l'obiettivo di approfondire la conoscenza della progettazione strutturale, questo lavoro ha sviluppato il progetto concettuale della bequilha, basato sui dati del velivolo presentato da DB nella competizione del 2024. Sono stati confrontati due modelli prismatici a sezione piena, - uno circolare e l'altro rettangolare - per selezionare i materiali per le pinne caudali, è stato utilizzato il metodo Ashby e, successivamente, il dimensionamento è stato verificato tramite analisi delle sollecitazioni utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM). I risultati della selezione dei materiali mediante il metodo Ashby, utilizzando la rigidità e il basso costo come parametri di ottimizzazione, hanno dimostrato che le leghe di alluminio sono i migliori candidati per l'applicazione. Tenendo conto delle geometrie studiate e della disponibilità dei materiali sul mercato, per entrambi i progetti proposti è stata scelta la lega 2024-T4. La sezione circolare presentava una massa inferiore in base al dimensionamento delle strutture. L'AEF ha convalidato entrambi i progetti secondo il criterio di resistenza di von Mises, indicando che sono in grado di resistere alle sollecitazioni imposte durante l'atterraggio dell'aereo, la condizione più critica per il componente, quando è soggetto a carichi più elevati.

Questo studio contribuisce al miglioramento dei futuri progetti strutturali nell'area dell'Aerodesign, fornendo linee guida per lo sviluppo dei componenti.

Parole chiave: Progetto. Bequilha. Aerodesign. Selezione dei materiali con il metodo Ashby. AEF.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Logo oficial da competição SAE Brasil AeroDesign	04
Figura 2 - Principais componentes de uma aeronave	05
Figura 3 - Projeto de aerodesign Dragão Branco 2024	08
Figura 4 - Equipe Dragão Branco ao lado do aerodesign construído em 2024	08
Figura 5 - Ilustração do trem de pouso do Dragão Branco 2024 na configuração triciclo, bequilha em destaque	09
Figura 6 - Haste da bequilha vista frontal	09
Figura 7 - Esquema de solicitação mecânica da bequilha	11
Figura 8 - Fluxograma detalhado do processo de projeto	12
Figura 9 - Etapas da metodologia de seleção de materiais de Ashby	14
Figura 10 - Mapa de Ashby $E \times \rho$ para diferentes classes de materiais e diferentes índices de mérito representados por retas tracejadas.	16
Figura 11 - Representação dos designs propostos para a bequilha	19
Figura 12 - Malha gerada para o design 1	26
Figura 13 - Condições de contorno aplicadas ao design 1 na simulação computacional	27
Figura 14 - Malha gerada para o design 2	27
Figura 15 - Condições de contorno aplicadas ao design 2 na simulação computacional	28
Figura 16 - Mapa de Ashby $E \times \rho$ design 1	29
Figura 17 - Mapa de Ashby $E \times \rho$ design 2	29
Figura 18 - Mapa de Ashby $E \times \rho$ ligas de Al	33
Figura 19 - Propriedades do material utilizado na simulação de elementos finitos	39
Figura 20 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises no design 1	40
Figura 21 - Região de maior tensão equivalente de von Mises design 1	40
Figura 22 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises no design 2	41
Figura 23 - Região de maior tensão equivalente de von Mises design 2	41

Figura 24 - Refinamento da malha e nova distribuição de tensões na região de concentração de tensão design 1	42
Figura 25 - Refinamento da malha e nova distribuição de tensões na região de concentração de tensão design 2	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Triagem de materiais design 1	29
Tabela 2 - Triagem de materiais design 2	30
Tabela 3 - Nomenclatura de ligas de alumínio	32
Tabela 4 - Índices de mérito das ligas de alumínio para o design 1	33
Tabela 5 - Índices de mérito das ligas de alumínio para o design 2	34
Tabela 6 - Composição da liga 2024	37
Tabela 7 - Propriedades da liga 2024	37

LISTA DE ABREVIATURAS

IM.	Índice de mérito
DB.	Dragão Branco Aerodesign
AEF.	Análise de elementos finitos
MEF.	Método dos elementos finitos
SAE.	Society of Automotive Engineers)

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Massa
b	Base do retângulo
h	Altura do retângulo
r	Raio da secção transversal
L	Comprimento da peça
ρ	Densidade do material
I	Momento de inercia da secção transversal
f	Função
FS	Fator de segurança
σ_{falha}	Tensão de falha
$\sigma_{projeto}$	Tensão de projeto
Al	Alumínio
Mg	Magnésio
A	Área
σ_{esc}	Tensão de escoamento
δ	Deflexão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
1.1	MOTIVAÇÕES	02
1.2	OBJETIVO	02
1.3	A DRAGÃO BRANCO	02
1.4	SAE BRASIL AERODESIGN	02
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	04
2.1	COMPONENTES DE UM AERODESIGN	04
2.2	PROJETO DRAGÃO BRANCO 2024	07
2.3	COMPONENTE BEQUILHA	08
2.4	SELEÇÃO DE MATERIAIS MÉTODO DE ASHBY	11
2.4.1	Software Granta EduPack	14
2.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	16
2.5.1	Ansys Workbench	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	DESIGN PROPOSTOS	19
3.2	SELEÇÃO DE MATERIAIS	20
3.2.1	Design de secção circular	20
3.2.2	Design de secção retangular	23
3.3	DIMENSIONAMENTO	24
3.4	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5	CONCLUSÃO	43
6	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE A - Considerações de dimensionamento do design 2	46
	APÊNDICE B – Planta design 1	47
	APÊNDICE C – Planta design 2	48

1 INTRODUÇÃO

Um aerodesign pode ser definido, de forma simples, como uma aeronave não tripulada e radiocontrolada, projetada com um propósito específico. Apesar de ser significativamente menor em comparação a um avião utilizado para transporte de passageiros, sua concepção segue os mesmos princípios fundamentais: construir uma estrutura rígida, aerodinâmica e leve, capaz de transportar a maior carga possível.

A SAE Brasil Aerodesign é uma competição anual que reúne equipes de diversas universidades do Brasil e até de outros países. Essas equipes desenvolvem e constroem aeronaves competitivas de acordo com o regulamento técnico publicado anualmente. A Dragão Branco Aerodesign, equipe da Universidade Federal de São Carlos, possui 20 anos de história e já participou de diversas edições da competição, buscando sempre inovação e desempenho.

O presente trabalho aborda o projeto de um componente específico de aerodesign: a bequilha. Este componente faz parte do conjunto responsável pelo contato da aeronave com o solo. No caso estudado, a configuração do trem de pouso é do tipo triciclo, em que duas rodas acopladas a uma estrutura fixada na parte inferior das asas suportam a maior parte das cargas. A bequilha, localizada na parte frontal, auxilia na sustentação da aeronave no solo e é essencial para a manobrabilidade terrestre, permitindo que o avião realize curvas enquanto está no solo.

O projeto da bequilha começa com a seleção de materiais pelo método de Ashby, considerando dois designs propostos. Este método é dividido em etapas: tradução, onde os requisitos do projeto são definidos em termos de função, restrições e variáveis livres; triagem, em que materiais que não atendem às restrições são descartados; classificação, onde equações da mecânica dos sólidos são aplicadas para calcular quão bem cada material pode desempenhar sua função com base nos objetivos definidos; e documentação, que analisa detalhadamente os materiais triados, propondo a melhor opção que equilibre todos os requisitos do projeto.

Com o material selecionado, é possível dimensionar a estrutura da bequilha, que, em seguida, é submetida a uma análise de tensões pelo MEF. Nesta etapa, a peça é dividida em pequenos elementos, e os cálculos baseados em critérios de falha são realizados pontualmente. O projeto é validado caso seja constatado que a

estrutura suporta as solicitações sem apresentar falhas e com um fator de segurança adequado.

1.1 MOTIVAÇÃO

O projeto de componentes técnicos para um aerodesign, como os desenvolvidos anualmente pela DB, é uma tarefa complexa, pois reflete a identidade de uma equipe composta por profissionais diversos. Durante o ano de 2023, a bequilha da aeronave apresentou diversas falhas, evidenciando a necessidade de revisões no projeto. Essa situação motivou a elaboração do presente trabalho, que busca explorar, de forma aprofundada, questões cruciais de projeto no campo da engenharia, com foco na melhoria do desempenho e na confiabilidade estrutural da bequilha.

1.2 OBJETIVO

Realizar o projeto conceitual de uma bequilha de aerodesign, com base na aeronave competitiva da equipe Dragão Branco Aerodesign apresentada na SAE Brasil AeroDesign 2024, comparando dois designs propostos, a partir da seleção de materiais pelo método de Ashby, dimensionamento da peça e validação pela análise em elementos finitos.

1.3 A DRAGÃO BRANCO

A DB Aerodesign é um projeto de extensão da Universidade Federal de São Carlos que tem como objetivo integrar estudantes de diferentes cursos e áreas do conhecimento para projetar e construir uma aeronave radiocontrolada. O projeto busca preparar uma aeronave competitiva para participar da SAE Brasil Aerodesign, competição realizada anualmente na cidade de São José dos Campos.

1.4 A SAE BRASIL AERODESIGN

O termo aerodesign pode se referir à construção de uma aeronave não tripulada e radiocontrolada, projetada com um propósito específico. Além disso, o termo também é utilizado em competições que avaliam e ranqueiam aerodesigns inscritos com base em critérios de pontuação. Segundo informações do site da própria instituição, a SAE (Society of Automotive Engineers) International foi fundada em 1905, em Nova York, com o objetivo de promover a troca de ideias entre profissionais da indústria automotiva. A partir de 1916, representantes da American Society of Aeronautic Engineers, da Society of Tractor Engineers e da indústria naval solicitaram que a SAE supervisionasse suas respectivas áreas. Desde então, a organização passou a abranger todos os setores relacionados à mobilidade. Em 1991, foi criada a SAE Brasil, uma sociedade afiliada com o propósito de ser a "casa do conhecimento" da mobilidade brasileira. Atualmente, além de desenvolver e publicar padrões utilizados nas indústrias aeroespacial, automotiva e de veículos comerciais, a SAE busca incentivar e apoiar o desenvolvimento de profissionais na área de mobilidade. A SAE Brasil Aerodesign é um exemplo concreto dessa missão.

A SAE Brasil Aerodesign é uma competição anual que reúne equipes de estudantes universitários para desenvolver um projeto aeronáutico desde sua concepção inicial, passando pelo projeto detalhado, até a construção e os testes. O principal objetivo é construir uma aeronave capaz de realizar um percurso definido, atendendo às exigências específicas estabelecidas no regulamento anual. Essas exigências podem incluir limitações na envergadura, na altura da aeronave ou em outros aspectos técnicos. A avaliação das equipes é realizada por um júri composto por engenheiros da indústria aeronáutica.

A competição conta com três categorias: Regular, Advanced e Micro, cada uma com requisitos específicos:

- A categoria Regular oferece maior liberdade de projeto.
- Na categoria Advanced, as aeronaves devem realizar voos autônomos e cumprir missões estabelecidas pela comissão organizadora.
- A categoria Micro é voltada para aeronaves que precisam carregar o máximo de peso possível, mantendo-se o mais leves possível.

Em 2024, a competição contou com 85 equipes inscritas nas três categorias.

O evento é dividido em duas etapas principais:

1. **Competição de Projeto:** Nessa etapa, as equipes elaboram um relatório técnico detalhado do projeto, cobrindo aspectos como aerodinâmica, cargas e aeroelasticidade, desempenho, estabilidade e controle, estruturas e ensaios estruturais, projeto elétrico e integração geral. Além disso, as equipes apresentam oralmente as concepções do projeto para uma banca avaliadora.
2. **Competição de Voo:** Nesta etapa, os aerodesigns construídos são submetidos a um percurso de voo, carregando uma carga que aumenta progressivamente a cada voo válido. Esse momento é crucial para determinar a carga máxima que cada aeronave pode transportar, a precisão do projeto, o peso vazio e a confiabilidade estrutural da aeronave.

As notas geradas nas duas etapas são utilizadas para ranquear e classificar as equipes participantes. A Figura 1 apresenta o logo da competição.

Figura 1 – Logo oficial da competição SAE Brasil AeroDesign.



Fonte: <https://www.aerocf.com.br/main/>

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

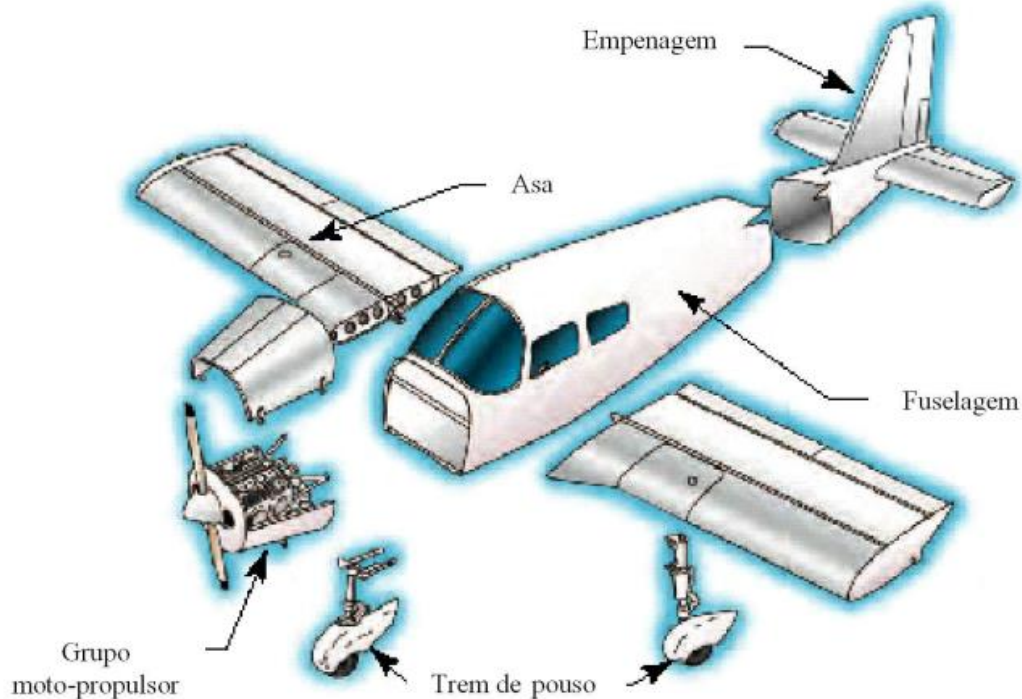
2.1 COMPONENTES DE UM AERODESIGN

Segundo Miranda, “Um avião é definido como uma aeronave de asa fixa mais pesada que o ar, movida por propulsão mecânica, que é mantida em condição de voo devido à reação dinâmica do ar que escoar através de suas asas” (Rodrigues, 2014, p. 13).

Apesar de cada aeronave ser única, todas possuem componentes estruturais

em comum: fuselagem, asas, empenagem, superfícies de controle, trem de pouso e conjunto motopropulsor. Cada um desses elementos é descrito a seguir e ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Principais componentes de uma aeronave.



Fonte: Rodrigues, 2014.

Fuselagem: é a base estrutural de toda a aeronave, responsável por dar forma ao corpo do avião e acomodar a carga transportada, sejam passageiros ou materiais. Existem três principais tipos de fuselagem:

- Treliça: Estrutura composta por vigas e barras treliçadas, cobertas por um material maleável. As vigas e barras suportam as solicitações mecânicas durante o voo.
- Monocoque: Estrutura onde perfis são unidos por um revestimento resistente, que suporta as solicitações mecânicas.
- Semi-monocoque: O tipo mais comum, que combina elementos de treliça e monocoque, proporcionando equilíbrio entre resistência e leveza.

Asas: são responsáveis pela sustentação da aeronave em voo. Seu design depende das características de voo desejadas, incluindo configurações como asa alta, média

ou baixa, além das formas como asa em diedro, gaivota ou gaivota invertida. As asas possuem os seguintes componentes principais:

- Longarina: Suporta a maior parte da carga durante o voo.
- Nervuras e falsas nervuras: Mantêm o formato aerodinâmico.
- Revestimento: Envolve toda a estrutura, contribuindo para a aerodinâmica.

O correto dimensionamento da longarina é essencial para garantir a segurança e o desempenho da aeronave.

Empenagem: localizada na cauda da aeronave, a empenagem auxilia na estabilidade e controle do voo. É composta por:

- Estabilizador horizontal: Responsável por equilibrar o movimento de inclinação.
- Estabilizador vertical: Contribui para o controle do movimento de guinada.

A estrutura da empenagem pode incluir longarinas e elementos semelhantes aos das asas.

Superfícies de Controle: permitem a movimentação da aeronave e são divididas em:

Primárias:

- Ailerons: Controlam o rolamento e estão no bordo de fuga das asas.
- Profundores: Localizados no estabilizador horizontal, controlam a inclinação.
- Lemes: No estabilizador vertical, controlam a guinada.

Auxiliares: Fixadas às superfícies primárias, facilitam suas funções, como compensadores, painéis de balanceamento, flaps, spoilers e dispositivos no bordo de ataque.

Trem de Pouso: suporta a aeronave no solo, durante o taxiamento e o pouso, que é a fase mais crítica. Ele pode ter duas configurações principais:

- Triciclo: Trem principal sob as asas e bequilha na parte frontal.
- Convencional: Trem principal sob as asas e bequilha na parte traseira.

Conta com sistemas de amortecimento para suavizar o impacto no pouso. Em aeronaves de grande porte, o trem de pouso é retrátil, sendo armazenado na fuselagem durante o voo para melhorar a aerodinâmica.

Conjunto Motopropulsor: composto pelo motor e pela hélice, o conjunto motopropulsor gera a força trativa necessária para impulsionar a aeronave. A rotação da hélice, acionada pelo motor, é responsável por criar o movimento. Dependendo do projeto, a aeronave pode ser:

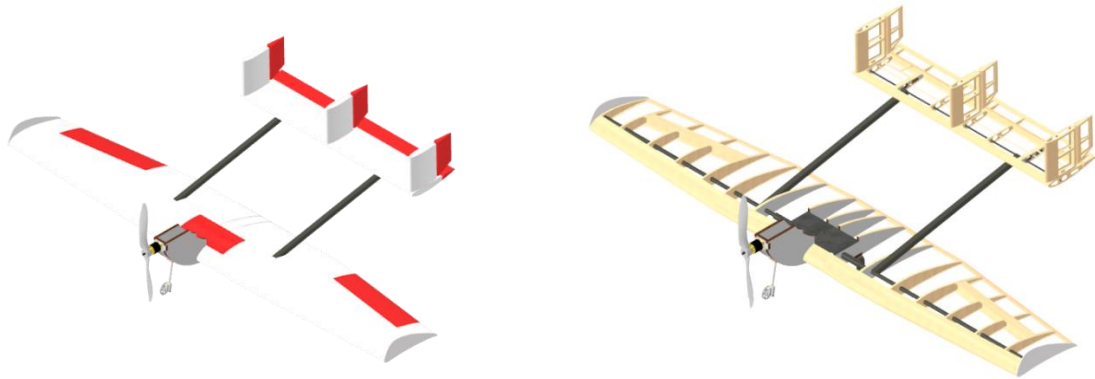
- Monomotor: Um único motor.
- Bimotor: Dois motores.
- Multimotor: Mais de dois motores.

2.2 PROJETO DRAGÃO BRANCO 2024

O aerodesign desenvolvido pela equipe Dragão Branco em 2024 foi um monoplano de asa mista reto-trapezoidal baixa, monomotor com configuração tractor, ou seja, com o motor localizado na parte frontal da aeronave, e trem de pouso triciclo. A principal inovação na configuração da aeronave foi a ausência de uma fuselagem convencional. A carga transportada pela aeronave foi posicionada no extradorso da asa, enquanto os componentes elétricos foram instalados no bico da aeronave.

A Figura 3, cedida pela equipe, apresenta a aeronave projetada, com e sem entelagem, destacando os principais componentes: asa, empenagem horizontal, empenagem vertical, tail boom e conjunto motopropulsor. A Figura 4, por sua vez, mostra parte da equipe ao lado do modelo de aerodesign final construído com base no projeto desenvolvido ao longo do ano, durante a competição SAE Brasil Aerodesign 2024.

Figura 3 – Projeto de aerodesign Dragão Branco 2024.



Fonte: Dragão Branco 2024.

Figura 4 – Equipe Dragão Branco ao lado do aerodesign construído em 2024.

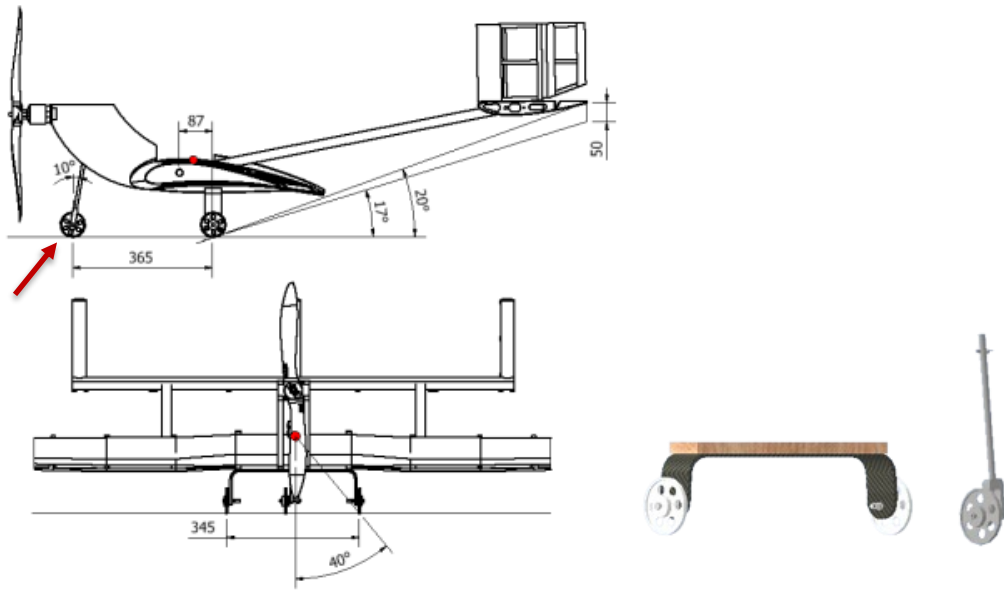


Fonte: Dragão Branco 2024.

2.3 COMPONENTE BEQUILHA

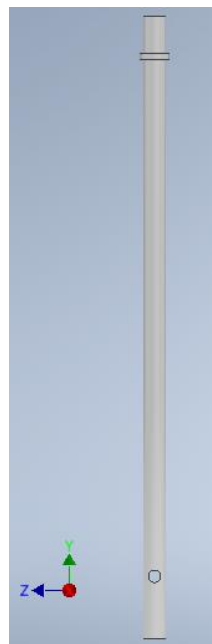
Como já citado anteriormente a equipe trabalhou com a configuração de trem de pouso triciclo descrita por Rodrigues com um trem principal logo abaixo da asa e uma bequilha na parte frontal. A figura 5 cedida pela DB apresenta esta configuração, destacando a bequilha.

Figura 5 – Ilustração do trem de pouso do Dragão Branco 2024 na configuração triciclo, bequilha em destaque.



Fonte: Dragão Branco 2024.

Figura 6: Haste da bequilha vista frontal.



Fonte: Autora, 2024.

Além de auxiliar na estabilidade da aeronave no solo, a bequilha desempenha um papel fundamental na manobrabilidade em solo, graças à sua rotação a aeronave é capaz de realizar curvas em solo. Para isso, a haste da bequilha em destaque na Figura 6 deve ser fixada de modo a restringir os movimentos nos eixos X, Y e Z, bem

como os momentos nos eixos X e Z, permitindo, no entanto, a rotação em torno do eixo Y. Essa movimentação é obtida através do acoplamento de um servo motor à bequilha, acionado remotamente pelo sistema de controle da aeronave.

A seção transversal da haste da bequilha não precisa seguir um formato específico, mas sua altura deve ser suficiente para garantir que a aeronave mantenha distância adequada do solo, evitando que componentes como a asa e a hélice toquem o chão. Além disso, é essencial que a estrutura apresente mínima deformação, pois falhas nesse componente podem comprometer o controle da aeronave no solo e levar a danos estruturais mais graves. Como em todos os componentes do aerodesign, é desejável que a peça seja projetada com o menor peso possível, sem comprometer sua funcionalidade.

O momento de maior solicitação mecânica da bequilha ocorre durante o pouso. A FAR Part 23 (2002) estabelece três cenários para pouso de uma aeronave:

- Pouso com as três rodas em contato com o solo;
- Pouso com apenas as rodas do trem de pouso principal;
- Pouso com uma única roda do trem de pouso principal.

Os valores de força calculados pela DB para as três situações, foram considerados neste trabalho. Para garantir um projeto conservador, adotou-se a força máxima referente ao pouso em apenas uma roda de maneira que a bequilha fosse responsável por suportar todo o esforço mecânico.

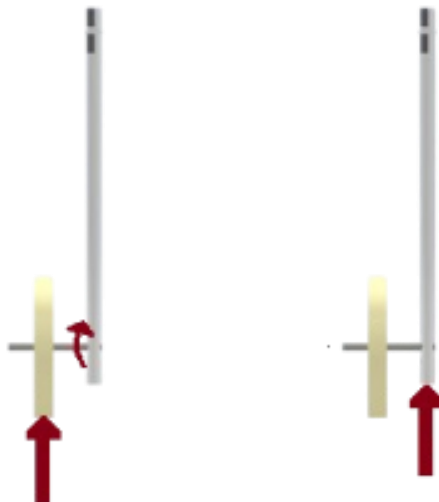
Conforme a Figura 7 duas abordagens podem ser utilizadas para analisar a condição de pouso da bequilha:

- Carregamento por flexão: causado pela transferência de momento do eixo que conecta a roda à haste da bequilha.
- Carregamento axial de compressão: considerando que a força gerada no pouso é transferida integralmente para a haste da bequilha.

Afim garantir uma abordagem mais conservadora, este trabalho considera a análise axial de compressão como critério principal de avaliação. No caso de uma

estrutura com relação de comprimento por espessura elevado os esforços compressivos podem gerar o fenômeno de flambagem, que é a flexão transversal devido a compressão.

Figura 7 –Esquema de solicitação mecânica da bequilha.



Fonte: Autora.

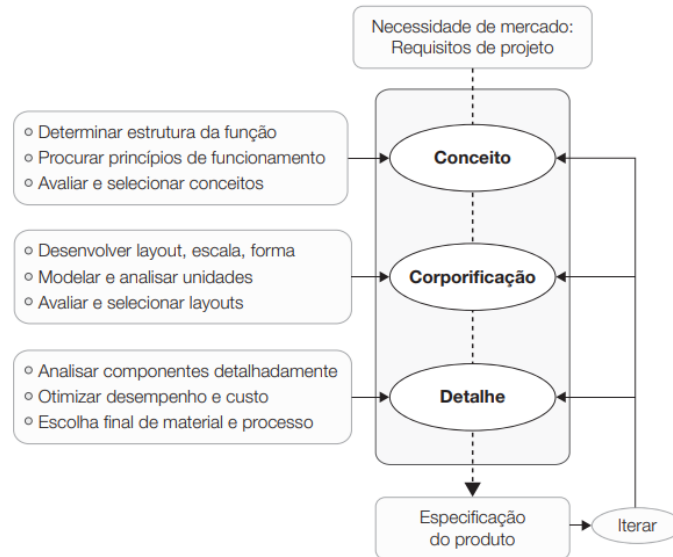
2. 4 SELEÇÃO DE MATERIAIS MÉTODO DE ASHBY

O método de seleção de materiais desenvolvido por Michael Ashby é orientado pelo projeto mecânico do produto em questão. Esse projeto deve abranger três etapas fundamentais: conceito, corporificação e detalhamento, conforme é apresentado na Figura 8. Na fase conceitual, define-se a função do componente sem impor restrições desnecessárias. Com isso, torna-se possível a corporificação, na qual o produto ganha forma e dimensões. Por fim, na etapa de detalhamento, os componentes são analisados cuidadosamente, otimizações são realizadas e o material definitivo é selecionado.

Segundo Ashby, o processo de seleção de materiais baseia-se na interação entre quatro pilares essenciais: função, material, forma e processo. Dada uma função específica para o componente, ela precisa assumir uma forma adequada. Consequentemente, apenas materiais que possam ser conformados nessa forma podem ser considerados, e, da mesma forma, certos materiais são viáveis apenas para funções compatíveis com suas propriedades e processos de fabricação. Esses

fatores são fundamentais no processo de seleção de materiais e devem ser levados em conta (ASHBY, 2012).

Figura 8 – Fluxograma detalhado do processo de projeto.



Fonte: Ashby, 2012.

Segundo Ashby, "a seleção envolve procurar a melhor combinação entre os perfis de propriedades dos materiais no universo e o perfil de propriedades exigido pelo projeto" (ASHBY, 2012, p. 90). Isso significa que, ao surgir a necessidade de um produto, inicia-se um processo de projeto no qual a escolha do material ocorre em paralelo. Inicialmente, considera-se o universo completo de materiais disponíveis. À medida que o projeto evolui, candidatos são descartados até que um material seja definido. O método de Ashby propõe que essa seleção seja sistemática, podendo ser descrita passo a passo. Para isso, são estabelecidas quatro etapas principais: tradução, triagem, classificação e documentação, conforme ilustrado na Figura 9. Essas etapas são detalhadas a seguir:

- Tradução: nesta fase, os requisitos do projeto são convertidos em propriedades de materiais necessárias para desempenhar a função desejada. Para isso, devem ser definidos:
 - Função mecânica da peça: por exemplo, se a peça se comporta como uma viga, um tirante ou uma coluna, o que determina a solicitação mecânica predominante.

- Restrições do projeto: incluem limitações de tamanho, peso, custo ou ambiente de operação.
 - Objetivos da seleção: podem envolver a minimização do peso ou do custo, ou a maximização da resistência.
 - Variáveis livres: aspectos que o projetista pode modificar sem comprometer a função da peça.
- Triagem: dadas as restrições do projeto, os materiais incapazes de atendê-las são descartados da seleção.
 - Classificação: após a triagem, os materiais remanescentes são organizados de acordo com os objetivos do projeto. Por exemplo, se a meta for minimizar custos, os materiais podem ser ordenados do mais barato para o mais caro. Nesta etapa, o uso de índices de mérito (IM) pode ser necessário. Um índice de mérito é uma relação matemática entre propriedades de um material, obtida a partir de equações de mecânica dos sólidos que descrevem o desempenho do componente conforme sua função mecânica. De acordo com a equação (1), o desempenho é uma função das solicitações que deve suportar, da sua geometria e das propriedades do material utilizado na sua confecção. Caso o objetivo do projeto não possa ser atendido apenas pela maximização ou minimização de uma única propriedade, um IM pode ser calculado e utilizado como critério de classificação.

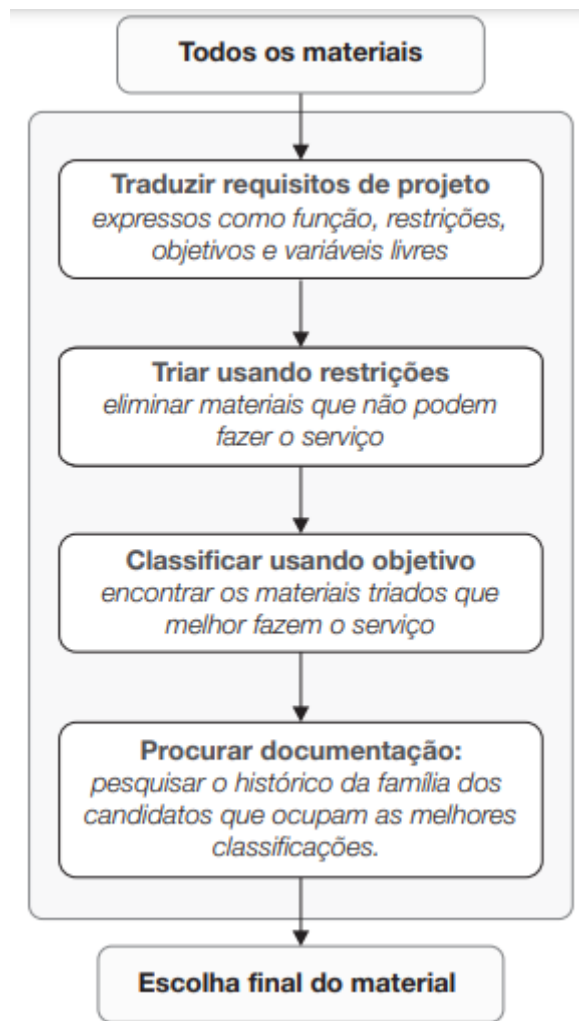
$$\text{Desempenho do componente} = f(\beta) * f(\gamma) * f(IM) \quad (1)$$

$f(\beta)$ = função dos requisitos funcionais

$f(\gamma)$ = função dos requisitos geométricos

- Documentação: entre os materiais mais bem classificados, aqueles que melhor atendem ao projeto são analisados detalhadamente. Esse estudo inclui a avaliação de atributos específicos, histórico de aplicação em projetos similares, estudos de caso, viabilidade de manufatura e quaisquer características adicionais que possam ser relevantes. A partir dessa análise, seleciona-se o material que melhor equilibra todas as exigências do projeto.

Figura 9 – Etapas da metodologia de seleção de materiais de Ashby.



Fonte: Ashby, 2012.

Para aplicar esse método de seleção de materiais, é essencial dispor de uma ampla base de dados que contemple todas as opções disponíveis no mercado. Ferramentas computacionais são uma solução eficaz para esse desafio. O próximo tópico apresenta um software que pode ser utilizado nesse processo.

2.4.1 Software Granta EduPack

O software Granta EduPack é utilizado em projetos de engenharia de materiais, design, ciência dos materiais e desenvolvimento sustentável. Ele possui uma ampla biblioteca de materiais e suas propriedades, sendo classificadas em níveis, 1,2 e 3, progressivamente elas aumentam o detalhamento da classificação dos

materiais, por exemplo no nível 1 encontramos metais, no nível 2 são diferenciadas ligas ferrosas e não ferrosas, no nível 3 encontra-se detalhadamente cada liga em específico. O software permite a visualização gráfica dos critérios de seleção. Isso é feito por meio da plotagem das propriedades de interesse utilizadas no projeto como eixos ordenados de um gráfico isto é, as propriedades são atribuídas aos eixos x e y e é possível obter uma visão geral do comportamento das classes dos materiais sob a ótica das propriedades plotadas.

O software emprega escalas logarítmicas para acomodar a grande variação das propriedades entre diferentes classes de materiais, facilitando a identificação dos materiais que maximizam ou minimizam determinada propriedade. Além disso, no caso da utilização de índices de mérito (IMs), é possível criar gráficos que relacionam diferentes propriedades. Devido ao uso da escala logarítmica, os IMs podem ser representados por retas nesses gráficos. Dessa forma, todos os materiais localizados sobre uma mesma reta possuem o mesmo valor de IM e apresentam desempenho equivalente para a aplicação analisada. Matematicamente, temos:

$$IM = \frac{x^n}{y^m} \quad (2)$$

Tomando o logaritmo da equação:

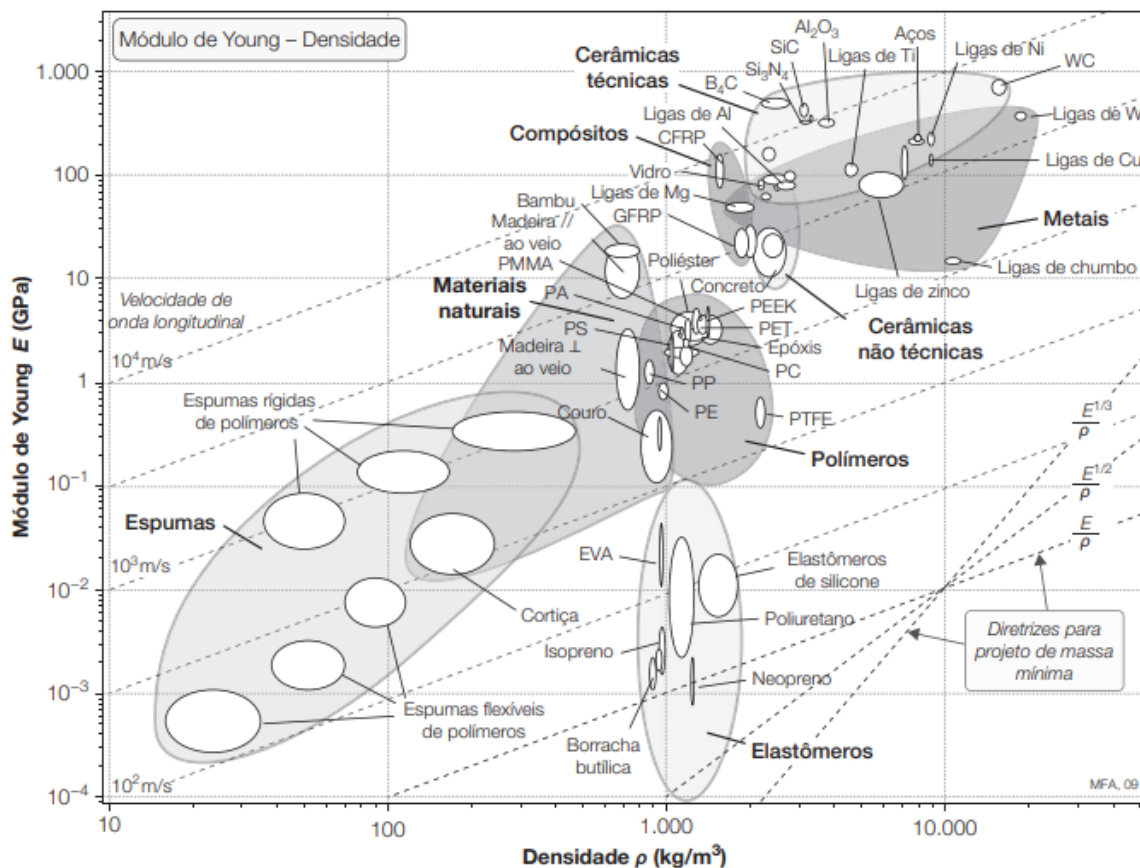
$$\log IM = n \log x + m \log y \quad (3)$$

Dessa forma, se uma propriedade estiver representada no eixo y, a equação pode ser reescrita no formato de uma reta, $y = ax + b$ pois, para valores fixos de x e y, o IM permanece constante, conforme ilustrado na equação acima.

A imagem a seguir apresenta um exemplo de gráfico gerado pelo software, conhecido como Mapa de Ashby. Neste caso, o IM analisado foi E/ρ , porém, as retas sugeridas indicam que também poderiam ser utilizados os índices $E^{1/2}/\rho$ ou $E^{1/3}/\rho$. O IM E/ρ relaciona a rigidez, pelo módulo elástico do material, com a massa que o componente pode apresentar pela densidade do material, ele normalmente é utilizado em aplicações aeronáuticas devido a necessidade de estruturas rígidas porém leves, quanto maior o expoente atribuído ao módulo elástico mais a rigidez é priorizada em

relação a densidade. As elipses no gráfico representam a distribuição dos valores das propriedades dos materiais que podem variar conforme seu tipo e processamento. Já as formas que englobam um conjunto de elipses correspondem às classes de materiais.

Figura 10 – Mapa de Ashby de E x ρ para diferentes classes de materiais e diferentes índices de mérito representados por retas tracejadas.



Fonte: Ashby, 2012.

2.5 METODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta utilizada na engenharia para analisar sistemas complexos, subdividindo-os em pequenos elementos interconectados, formando uma malha. A conexão entre esses elementos é chamada de nó, e cada um deles recebe atributos como geometria, propriedades do material e condições de contorno, que podem ser restrições aos graus de liberdade do nó, cargas, momentos, temperatura, etc. Dessa forma, é possível realizar análises

matemáticas para prever a resposta de uma peça ou de um conjunto de peças montadas sob determinada solicitação, calculando pontualmente os esforços solicitantes e deformações e tensões geradas em cada nó. O elemento representa uma média entre valores calculados em cada conjunto de nós que delimita o elemento (os nós são os vértices do elemento).

A análise por elementos finitos (AEF) consiste na interpretação dos cálculos realizados pelo MEF. Existem diferentes tipos de malhas, cada uma mais adequada para um tipo específico de análise. Como os resultados são obtidos pontualmente, uma malha mais refinada (com maior número de nós) tende a gerar resultados mais precisos, porém, também aumenta o custo computacional necessário para a simulação. Embora algumas condições possam ser resolvidas manualmente, a AEF proporciona uma visualização mais detalhada dos esforços no conjunto analisado, permitindo propor melhorias no projeto e até mesmo validar seu desempenho em diferentes condições operacionais.

A análise por MEF é definida em algumas etapas. Inicialmente o modelo geométrico é criado em um arquivo sólido em 3 dimensões em um software CAD. Após a geometria ser definida, o arquivo é transportado para um software do tipo CAE (Computer Aided Engineering), no qual a análise de tensões é realizada. Para isso, define-se o material constituinte do componente a partir de uma biblioteca interna ou definindo as propriedades do material manualmente, em seguida são definidas as condições de contorno, que são a aplicação de restrições e solicitações mecânicas do modelo. As restrições são definidas através da seleção de faces, arestas ou vértices do modelo que terão seus alguns ou todos seus graus de liberdade restringidos (três translações e 3 rotações nos eixos x, y e z); Após definição de como o modelo é fixado no espaço, aplicam-se forças, torques, deslocamentos ou massas em diferentes regiões do modelo de maneira a tentar reproduzir a solicitação real do modelo. Finalmente a malha pode ser criada, quando o componente é subdividido em diversos elementos tetraédricos (ou de outras geometrias, a depender do software e configuração) através do volume do componente. Esses elementos são unidos através de seus vértices, chamados nós, sendo nestes pontos onde diversas equações são resolvidas para que as deformações e tensões resultantes da solicitação do modelo sejam calculadas. As equações diferenciais utilizadas pelos algoritmos dos solvers nestes softwares são baseadas na mecânica dos sólidos

clássica, sendo que o algoritmo utilizado para o cálculo das deformações e tensões variam de software para software. Após a resolução das equações, diferentes informações podem ser obtidas para análise do modelo, como deformação total equivalente, deformação em cada eixo, tensões principais, tensões de von Mises, deslocamentos resultantes, plotagem de qualidade da malha, fator de segurança do modelo, etc.

A AEF pode ser aplicada a análises estáticas, isto é, as respostas esperadas não dependem do tempo, dinâmicas, quando as respostas esperadas dependem do tempo e modais quando a resposta é condicionada por um modo de vibração. Neste trabalho, será realizada uma análise estática, considerando as solicitações que ocorrem no momento mais crítico de utilização do modelo: o pouso. O objetivo é verificar se o componente falha nessa situação. Para isso, será adotado o critério de falha de von Mises, que estabelece que um material dúctil, homogêneo e isotrópico, sob carregamento estático, falha quando a tensão de von Mises ultrapassa a tensão de escoamento do material analisado. A tensão de von Mises é apresentada na equação 4.

Através do MEF, é possível calcular pontualmente a tensão de von Mises ao longo da malha e compará-la com a tensão de escoamento do material. Esse procedimento permite validar o projeto e garantir que a estrutura atenda aos requisitos mecânicos especificados.

$$\sigma_{von\ Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{3}} \quad (4)$$

2.5.1 Software Ansys Workbench

O Workbench é uma ferramenta de gerenciamento de simulações que integra os diversos produtos da Ansys. O software permite a criação ou importação de geometrias de peças ou conjunto de peças montadas. Além disso, permite a definição de propriedades do material, condições de apoio e fixação, bem como a aplicação das forças atuantes. O Workbench também gera automaticamente uma malha para a geometria trabalhada, que pode ser editada conforme as necessidades do projeto.

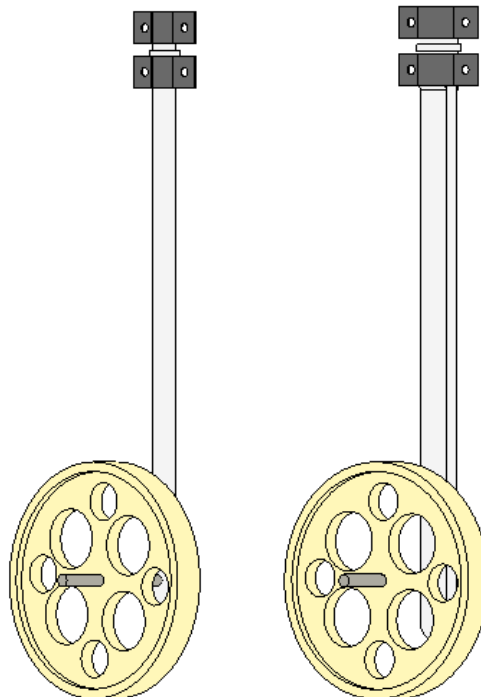
Com uma ampla gama de funcionalidades, o software possibilita a execução de diversos tipos de simulações, que devem ser interpretadas pelo projetista de acordo com os objetivos do estudo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESIGN PROPOSTOS

Pensando na função da bequilha, os designs foram desenvolvidos de forma a permitir a rotação da haste no eixo y conforme apresentado anteriormente na figura 6, garantindo as manobras em solo da aeronave. Foram propostas duas geometrias: uma de seção transversal circular e outra retangular, sendo obrigatória a utilização de seção circular na região de fixação da peça para possibilitar o giro. A figura 11 apresenta uma ilustração dos designs propostos, mais detalhes são apresentados nos apêndices B e C com os detalhamentos contendo as dimensões das geometrias propostas.

Figura 11: Representação dos designs propostos para a bequilha.



Fonte: autora.

3.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS

Utilizando o método de Ashby, o primeiro passo para a seleção de materiais da bequilha é a tradução dos requisitos do projeto. Com base nas informações apresentadas anteriormente, podemos traduzi-las da seguinte forma:

- **Função:** A bequilha auxilia na sustentação da aeronave no solo e durante o pouso, além de garantir sua manobrabilidade terrestre, nesta análise será tratada como uma coluna com uma extremidade livre e outra extremidade engastada.
- **Restrições:** O comprimento da bequilha, considerando o aerodesign da Dragão Branco 2024, deve ser 200 mm. A estrutura deve ser capaz de suportar uma força vertical de 307 N sem apresentar deflexão excessiva. Além disso, devido às limitações financeiras do projeto de extensão, o custo do material não deve exceder 50 R\$/kg.
- **Objetivo:** Minimizar a massa da peça.
- **Variáveis livres:** Área e geometria da seção transversal.

Baseado em maximização de rigidez e minimização de massa, deve-se buscar um índice de mérito (IM) que atenda à tradução para os dois designs propostos:

- ❖ Design 1 – Seção transversal circular maciça
- ❖ Design 2 – Seção transversal retangular maciça

3.2.1 Design de secção circular

Para minimizar a massa, partimos da seguinte equação:

$$m = \pi \cdot r^2 \cdot L \cdot \rho \quad (5)$$

Considerando que a bequilha não deve sofrer flambagem, utilizamos a

equação da força crítica para uma coluna (válida caso a tensão gerada seja inferior à tensão de escoamento do material):

$$F_{Cri} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(KL)^2} \quad (6)$$

O fator K transforma o comprimento da coluna em seu comprimento efetivo, ou seja, a distância entre os pontos de momento nulo. Para uma bequilha com uma extremidade engastada e a outra livre, $K = 2$. Com isso, substituindo o momento de inércia de uma seção circular:

$$F_{Cri} = \frac{\pi^2 \cdot E}{4 \cdot L^2} \cdot \frac{\pi r^4}{4} \quad (7)$$

Isolando r^2 e substituindo na equação (5):

$$r^2 = \frac{4 \cdot L \cdot F_{Cri}^{\frac{1}{2}}}{\pi^2 \cdot E^{\frac{1}{2}}}$$

$$m = 4 F_{Cri}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{L^2}{\pi^2} \cdot \frac{\rho}{E^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

Dessa forma, obtemos uma equação onde a eficiência do material depende de fatores funcionais (como a força aplicada), geométricos (como o comprimento da peça) e do índice de mérito (IM) definido por $IM = \frac{\rho}{E^{\frac{1}{2}}}$. Para minimizar a massa, é necessário maximizar a relação $\frac{1}{\rho} \cdot E^{\frac{1}{2}}$.

Para a segunda etapa, a triagem, foi utilizado o software Granta EduPack. A partir do IM deduzido, constrói-se um Mapa de Ashby, onde o módulo de Young (E) é representado no eixo vertical, e a densidade (ρ) eixo horizontal. Para um primeiro refinamento, foi utilizada a database de nível 2 do software, abrangendo os seguintes grupos de materiais:

- Compósitos
- Materiais naturais
- Metais e ligas
- Termoplásticos
- Termorrígidos

Para guiar a triagem, utiliza-se uma reta definida por:

$$\log IM = \log \rho + \frac{1}{2} \cdot \log E$$

$$\log E = 2 \cdot \log \rho + 2 \cdot \log IM \quad (9)$$

Ou seja uma reta de inclinação 2.

Supondo um raio da seção transversal de 5 mm, valor adotado no projeto da Dragão Branco 2024, e considerando a força máxima de solicitação igual a 307 N, aplicamos a Equação (7):

$$307N = \frac{\pi^2 \cdot E}{4 \cdot (200mm)^2} \cdot \frac{\pi \cdot (5mm)^4}{4}$$

$$E = 10,1 \text{ GPa}$$

Esse valor pode ser utilizado para limitar as opções de materiais. Além disso, a restrição de preço também é aplicada na seleção.

Após a triagem, os materiais remanescentes são classificados pelo cálculo dos IMs. Os candidatos selecionados passam por uma análise detalhada, considerando suas propriedades, histórico de uso em aplicações similares, viabilidade de manufatura e outras características relevantes para o projeto.

Para essa etapa de documentação, utilizou-se a database de nível 3 do Granta EduPack, restringindo-se ao subconjunto de materiais classificados anteriormente. A partir dessa nova filtragem, um novo Mapa de Ashby foi gerado, permitindo a seleção do material final.

3.2.2 Design de secção retangular

Semelhante ao processo realizado para o design de seção circular, é possível deduzir o índice de mérito (IM) para a seção retangular:

$$m = b \cdot h \cdot L \cdot \rho \quad (10)$$

$$F_{Cri} = \frac{\pi^2 \cdot E}{4 \cdot L^2} \cdot \frac{h \cdot b^3}{12} \quad (11)$$

$$b = \frac{48^{\frac{1}{3}} \cdot L^2 \cdot F_{Cri}^{\frac{1}{3}}}{\pi^{\frac{2}{3}} \cdot E^{\frac{1}{3}} \cdot h^{\frac{1}{3}}}$$

$$m = 48^{\frac{1}{3}} F_{Cri}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{L^{\frac{5}{3}} \cdot h^{\frac{2}{3}}}{\pi^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}} \quad (12)$$

Dessa forma, o IM associado ao design de seção retangular é dado por $\frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho}$.

As linhas guias traçadas no Mapa de Ashby seguirão a relação:

$$\log IM = \log \rho + \frac{1}{3} \cdot \log E$$

$$\log E = 3 \cdot \log \rho + 3 \cdot \log IM \quad (13)$$

Ou seja, uma reta de inclinação 3.

Considerando um retângulo com dimensões $b = 5mm$ e $h = 8,6mm$ essa geometria pode ser obtida a partir do mesmo cilindro proposto no design 1, conforme ilustrado no Anexo A.

A partir da equação de força crítica:

$$307N = \frac{\pi^2 \cdot E}{4 \cdot (200mm)^2} \cdot \frac{8,6mm \cdot (5mm)^3}{12}$$

$$E = 55,6 \text{ GPa}$$

Assim, obtemos um limite mínimo para o módulo de Young do material. O Mapa de Ashby é gerado conforme descrito no item anterior, ajustando-se a inclinação da reta e a restrição para o módulo de Young. A classificação e a documentação dos materiais seguem o mesmo procedimento adotado anteriormente.

3.3 DIMENSIONAMENTO

A partir do material selecionado, é possível definir as dimensões da peça com base em suas propriedades. Para os cálculos, foi adotado um fator de segurança igual a 2, valor recomendado para componentes aeronáuticos. A equação 14 mostra o cálculo para o fator de segurança, com este dado os cálculos podem ser feitos:

$$FS = \frac{F_{Falha}}{F_{projeto}} \quad (14)$$

$$2 = \frac{F_{Cri}}{F_{projeto}}$$

No caso da secção circular:

$$2F_{projeto} = \frac{\pi^2 E}{4L^2} \frac{\pi r^4}{4}$$

$$32F_{projeto} L^2 = \pi^3 E r^4$$

$$r = \sqrt[4]{\frac{32F_{projeto} L^2}{\pi^3 E}} \quad (15)$$

Dado o sentido físico deste cálculo tomaremos a raiz positiva da equação como resultado final. No caso da secção retangular:

$$2F_{projeto} = \frac{\pi^2 E}{4L^2} \frac{hb^3}{12}$$

$$96F_{projeto} L^2 = \pi^2 E hb^3$$

$$h = \frac{96F_{projeto} L^2}{\pi^2 E b^3}$$

Tomando uma proporção 2:1 para os lados do retângulo temos:

$$b = \sqrt[4]{\frac{48F_{projeto} L^2}{\pi^2 E}} \quad (16)$$

$$h = 2b \quad (17)$$

Novamente o resultado adotado é a raiz positiva da equação.

Tendo as dimensões da peça torna-se possível calcular seu volume e portanto seu peso a partir do conhecimento da densidade do material. Este valor pode ser comparando entre os dois designs propostos.

Apesar do projeto não partir da solicitação em flexão da bequilha é interessante averiguar se nessa condição haveria uma deflexão significativa. A deflexão do componente pode ser calculada pela relação:

$$\delta = \frac{M * L^2}{2 * E * I} \quad (18)$$

Onde o momento (M) atuante é obtido pelo diagrama de corpo livre do sistema como a força prevista no projeto vezes a distância horizontal da roda até a haste da bequilha tomada neste trabalho como 5 mm. Pode se limitar o projeto a uma deflexão máxima de 5 mm caso o valor encontrado supere esse limite a secção transversal da peça deverá ser redimensionada.

3.4 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

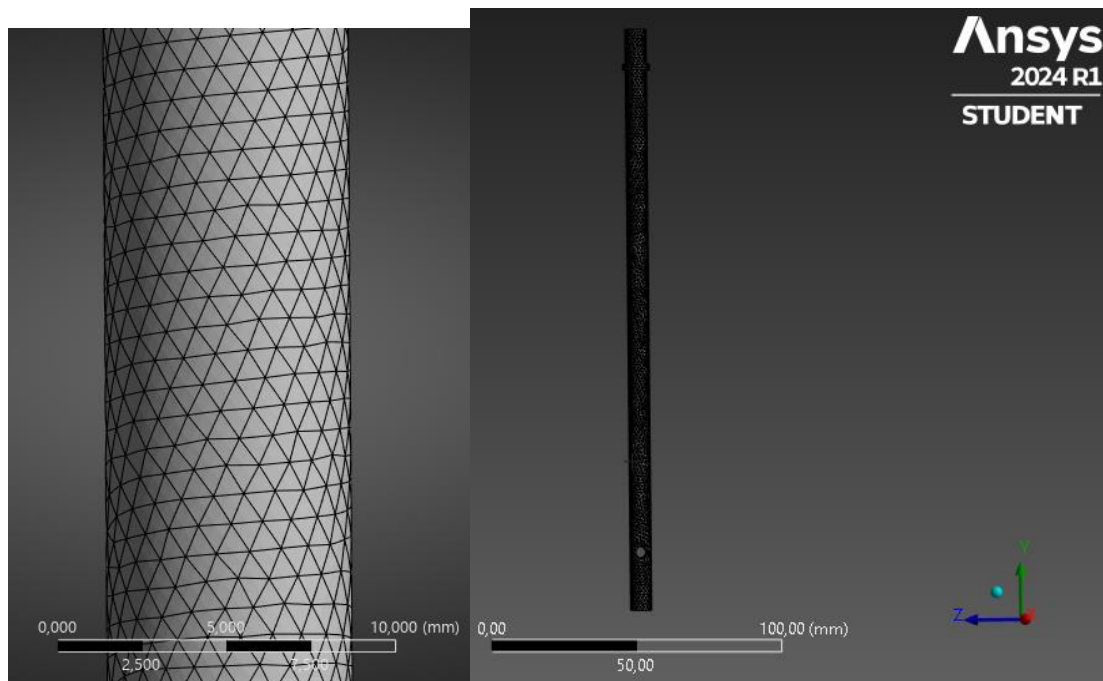
Para a realização da AEF, foi escolhido o modelo estático na plataforma Ansys Workbench. Na aba Engineering Data, o material selecionado foi inserido, enquanto na aba Geometry, foi feito o upload da geometria do componente.

Ao acessar a aba Model, o software direcionou o projeto para a plataforma

Mechanical, onde foi gerada uma malha para a geometria. Essa malha foi refinada para garantir resultados mais precisos e é representada nas figuras 12 e 14. O design 1 utilizou uma malha com 38.406 nós e 23.350 elementos enquanto o design 2 utilizou 28.887 nós e 17.592 elementos. Em seguida, foi aplicado um engaste na extremidade superior da geometria, enquanto na extremidade inferior, foi inserida a força de reação de 307 N, conforme apresentado nas Figuras 13 e 15.

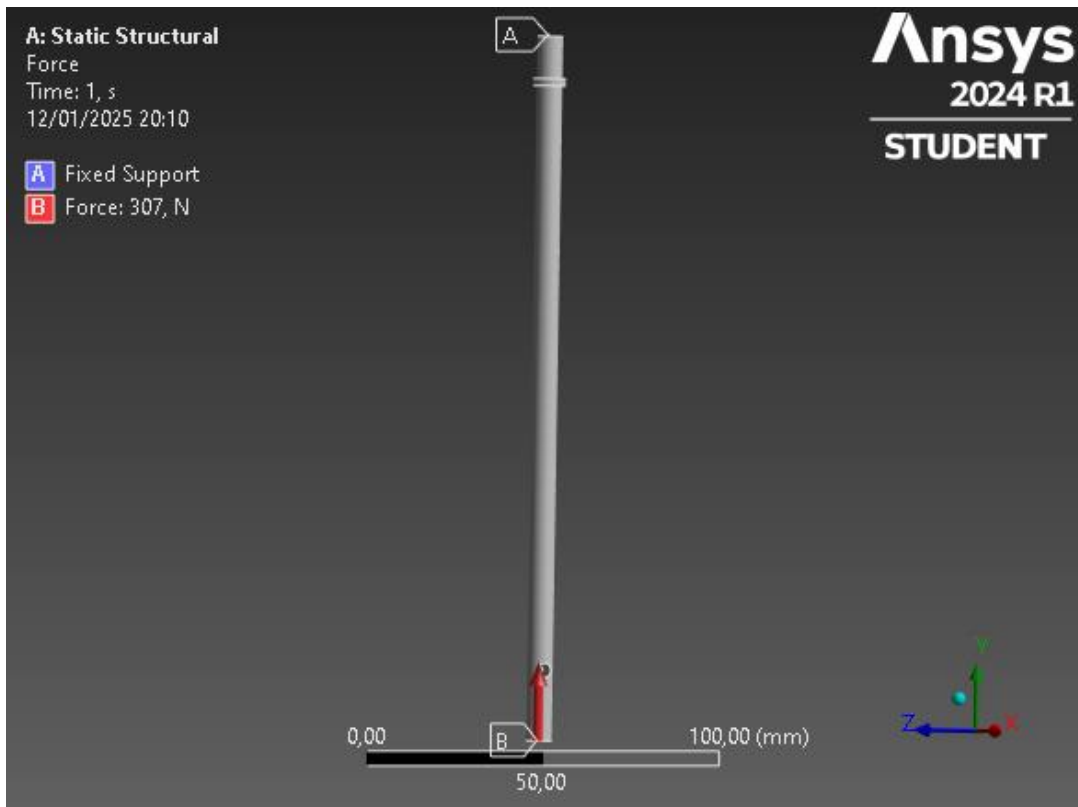
Por fim, foi definida uma plotagem da distribuição das tensões de von Mises resultantes da solitação para posterior análise de resultados.

Figura 12 – Malha gerada para o design 1.



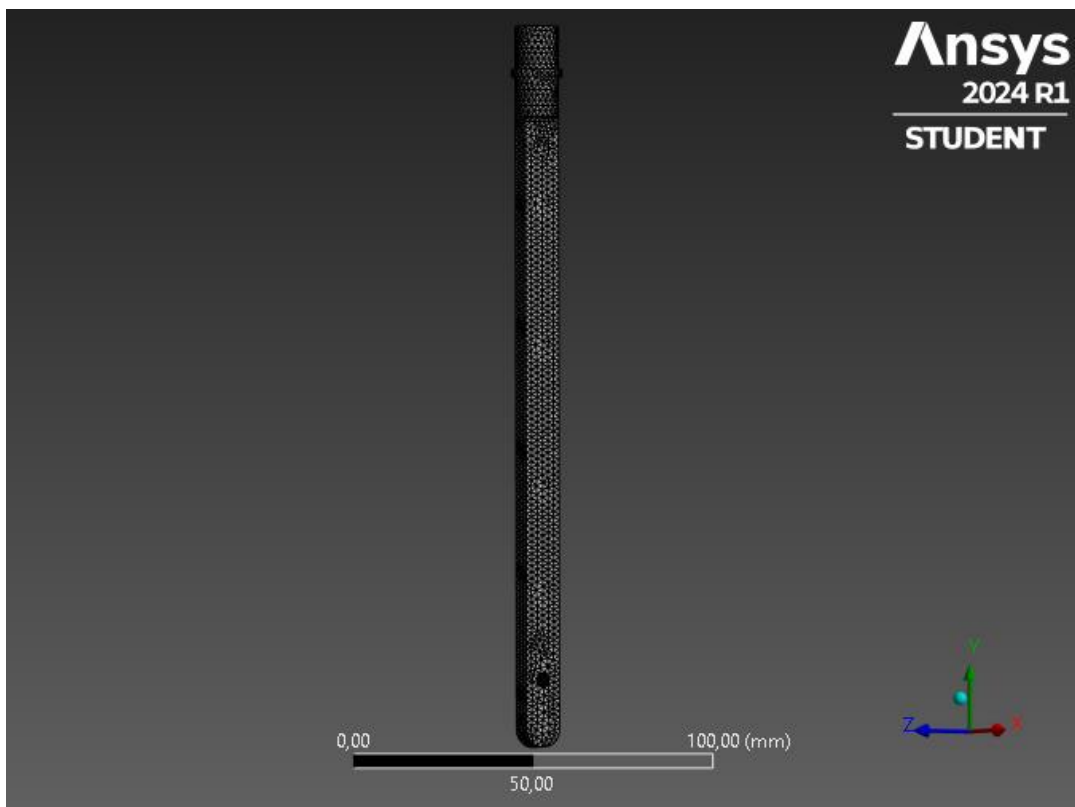
Fonte: Ansys Workbench 2024 R1.

Figura 13 – Condições de contorno aplicadas ao design 1 na simulação computacional.



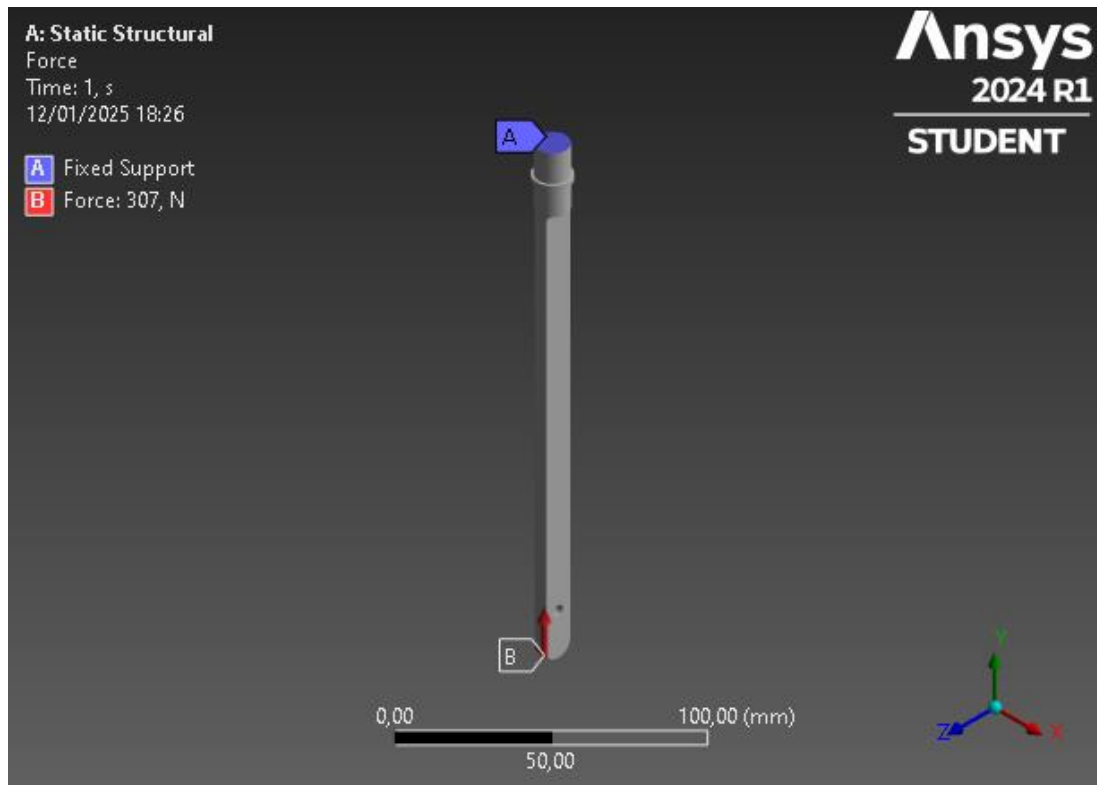
Fonte: Ansys Workbench 2024 R1, adaptada.

Figura 14 – Malha gerada para o design 2.



Fonte: Ansys Workbench 2024 R1, adaptada.

Figura 15 – Condições de contorno aplicadas ao design 2 na simulação computacional.

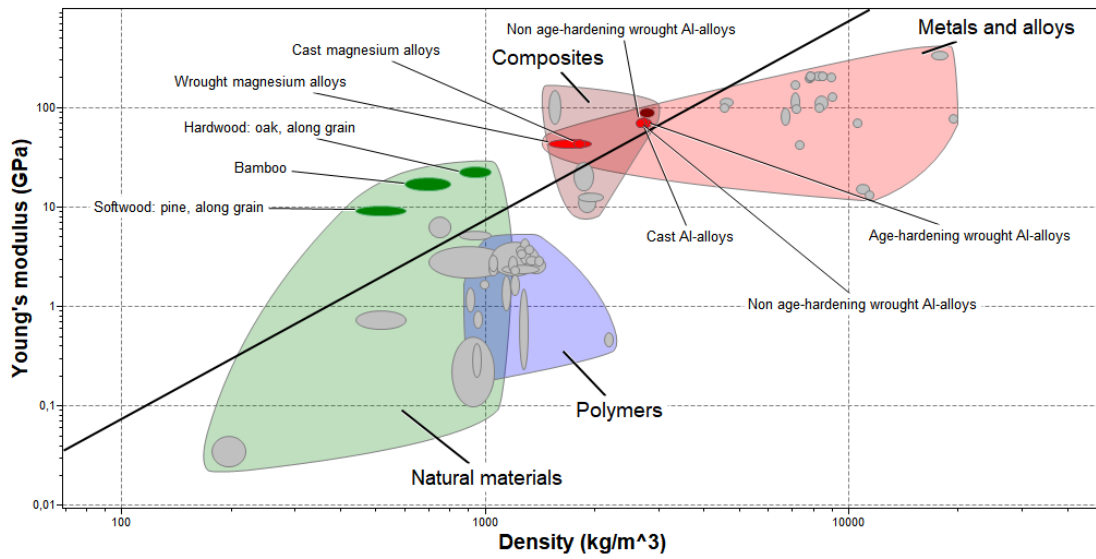


Fonte: Ansys Workbench 2024 R1, adaptada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

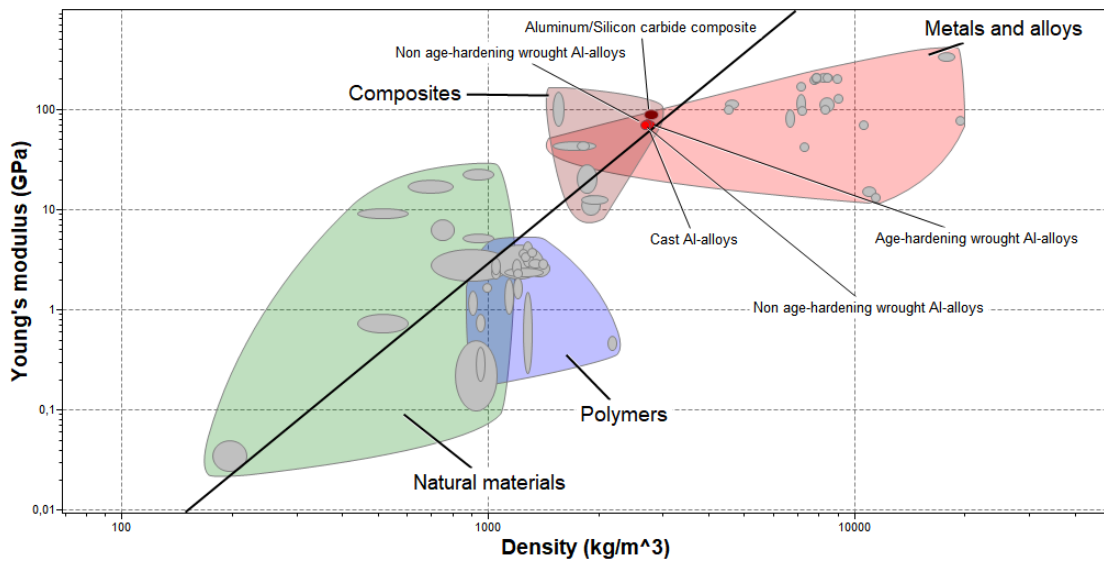
Os Mapas de Ashby, apresentados nas Figuras 16 e 17, foram gerados a partir dos IMs deduzidos, considerando as restrições de preço e rigidez, além do universo de materiais anteriormente descrito. Observa-se que as classes de materiais seguem uma tendência, onde materiais mais rígidos geralmente possuem maior densidade, enquanto materiais menos densos tendem a ser mais flexíveis. Um ponto relevante é que, apesar da alta resistência e leveza dos compósitos, esses materiais foram excluídos da seleção devido à restrição de custo adotada.

Figura 16 – Mapa de Ashby E x ρ design 1.



Fonte: Granta EduPack 2020,2024.

Figura 17 – Mapa de Ashby E x ρ design 2.



Fonte: Granta EduPack 2020.

As tabelas 1 e 2 apresentam os materiais que passaram pela triagem e seu respectivo IM calculado em ordem crescente.

Tabela 1: Triagem de materiais design 1.

Material	IM
Bamboo	$6,01 \cdot 10^{-3}$

Madeira de pinho no sentido da fibra	$5,94 \cdot 10^{-3}$
Madeira de carvalho no sentido da fibra	$5,10 \cdot 10^{-3}$
Ligas de Mg forjadas	$3,90 \cdot 10^{-3}$
Ligas de Mg fundidas	$3,69 \cdot 10^{-3}$
AlSiC	$3,42 \cdot 10^{-3}$
Ligas de Al forjadas não envelhecidas	$3,17 \cdot 10^{-3}$
Ligas de Al fundido	$3,14 \cdot 10^{-3}$
Ligas de Al forjadas envelhecidas	$3,08 \cdot 10^{-3}$

Fonte: Granta EduPack 2020.

Tabela 2: Triagem de materiais design 2.

Material	IM
AlSiC	$1,61 \cdot 10^{-3}$
Ligas de Al de trabalho mecânico não encruáveis	$1,56 \cdot 10^{-3}$
Ligas de Al fundido	$1,54 \cdot 10^{-3}$
Ligas de Al de trabalho mecânico encruáveis	$1,51 \cdot 10^{-3}$

Fonte: Granta EduPack 2020.

Os materiais naturais, como bambu e madeiras, apresentaram os maiores IMs, conforme mostrado na Tabela 1. No entanto, as propriedades desses materiais variam significativamente de acordo com o fornecedor, além disso a manufatura deste material exige um conhecimento prévio para ser realizada, por esses motivos, esses materiais foram descartados da seleção.

As ligas de magnésio são conhecidas por sua baixa densidade, com o Mg apresentando apenas $1,7 \text{ g/cm}^3$, o que as torna altamente atrativas para esta aplicação. No entanto, uma rápida pesquisa no de mercado em fornecedores de ligas revelou que a aquisição de barras desse material não é simples, pois não há fornecedores locais nem venda no varejo. Assim, as ligas de magnésio também foram descartadas. Da mesma forma, os compósitos de alumínio com carbeto de silício não são facilmente encontrados no mercado, tornando seu uso pouco viável.

Diante dessas restrições de disponibilidade e manufatura, as ligas de alumínio de trabalho mecânico não encruáveis foram a melhor opção com maior IM, pois podem ser facilmente encontradas em vendas online.

A Tabela 2, que apresenta os materiais triados para o design de seção retangular, destaca em primeiro lugar os compósitos de alumínio com carbetos de silício, que foram descartados pela dificuldade de aquisição. Assim, as ligas de alumínio de trabalho mecânico não encruáveis tornam-se novamente as mais viáveis para a seleção.

O alumínio é um metal amplamente utilizado devido à sua leveza, resistência à corrosão e relativa resistência mecânica. Segundo o Instituto Internacional do Alumínio, 66.522 toneladas de alumínio primário foram produzidas em 2024. Esse material possui um ponto de fusão relativamente baixo (660°C) e densidade de 2,70 g/cm³, cerca de 35% menor que o aço, por exemplo. Além disso, apresenta alta condutividade elétrica e térmica, sendo explorado em diversas aplicações. Sua resistência à corrosão é garantida pela formação de uma camada protetora de óxido, que o protege da ocorrência de corrosão. Outro aspecto relevante é que o alumínio pode ser reciclado infinitamente sem perder suas propriedades, favorecendo um ciclo de vida circular.

Nas Tabelas 1 e 2, as três principais classes de ligas de alumínio—ligas de trabalho mecânico não endurecíveis por tratamento térmico, ligas fundidas e ligas de trabalho mecânico endurecíveis por tratamento térmico—apresentam valores de IM próximos, portanto devem ser analisadas cuidadosamente. A Tabela 3 detalha a nomenclatura e composição das ligas de alumínio. Segundo o software, as ligas de trabalho mecânico não endurecíveis por tratamento térmico incluem as séries 1XXX, 3XXX, 5XXX e 8XXX, enquanto as demais são endurecíveis por tratamento térmico.

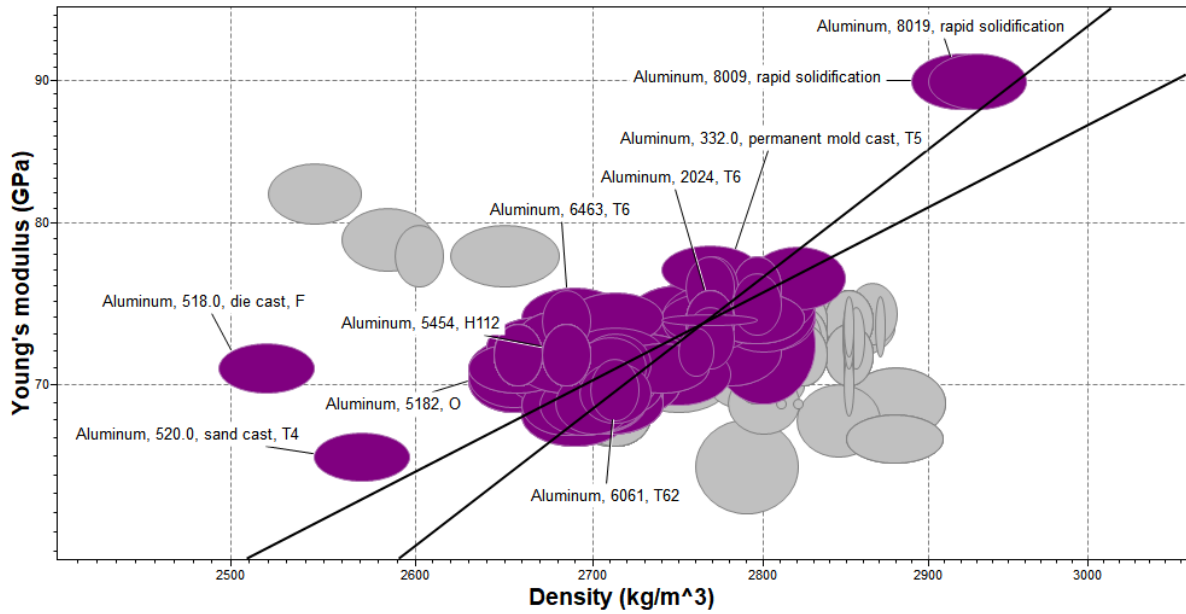
Seguindo o processo de seleção de materiais, a Figura 18 apresenta o Mapa de Ashby para todas as ligas de alumínio, considerando a limitação de custo a fim de selecionar uma liga para a aplicação. Já as Tabelas 4 e 5 trazem os valores de IM para cada design analisado.

Tabela 3: Nomenclatura de ligas de alumínio.

Alumínio e suas ligas para trabalho a frio	
Designação da série	Indicação da composição
1XXX	99,00% mínimo de Al
2XXX	Cobre
4XXX	Manganês
5XXX	Silício
6XXX	Magnésio
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
Alumínio e suas ligas fundidas	
1XX.X	99,00% mínimo de Al
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício e cobre e/ou magnésio
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
6XX.X	Serie não utilizada
7XX.X	Zinco

Fonte: Seleção de metais não ferrosos, Bresciani Ettore, adaptada.

Figura 18 – Mapa de Ashby E x ρ ligas de Al.



Fonte: Granta EduPack 2020, 2024.

Tabela 4: Índices de mérito $\frac{E^2}{\rho}$ das ligas de alumínio para o design 1.

Material	IM	Material	IM
518.0	0,00334	336.0	0,00317
8009	0,00325	332.0	0,00317
8019	0,00324	5182	0,00316
359.0	0,00320	520.0	0,00316
6463	0,00320	5454	0,00316
5083	0,00319	5251	0,00315
5086	0,00319	6082	0,00314
5456	0,00319	360.0	0,00314
5154	0,00318	443.0	0,00314
356.0	0,00318	5005	0,00314
514.0	0,00317	5754	0,00313
423.0	0,00317	2618	0,00313

357.0	0,00313	3103	0,00309
5052	0,00312	355.0	0,00309
6060	0,00311	3004	0,00309
6156	0,00311	6022	0,00309
3105	0,00311	3016	0,00309
1080	0,00311	2524	0,00308
150.1	0,00311	304	0,00308
333.0	0,00311	6061	0,00308
2026	0,00311	2010	0,00308
2024	0,00310	2008	0,00308
2124	0,00310	319.0	0,00308
7249	0,00310	6010	0,00308
380.0	0,00308	6063	0,00307
383.0	0,00308	6111	0,00306
6151	0,00307	6009	0,00306
6005	0,00307	2036	0,00306
2017	0,00307	7020	0,00305
2014	0,00307	7075	0,00304

Fonte: Granta EduPack 2020, 2024, adaptada.

Tabela 5: Índices de mérito $\frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho}$ das ligas de alumínio para o design 2.

Material	IM	Material	IM
518.0	0,00164	359.0	0,00156
520.0	0,00157	6463	0,00156
5083	0,00156	5154	0,00156
5456	0,00156	514.0	0,00156

413.0	0,00156	6063	0,00152
356.0	0,00156	6010	0,00152
5182	0,00155	2024	0,00152
5454	0,00155	6070	0,00152
336.0	0,00155	3103	0,00152
5251	0,00155	6005	0,00152
360.0	0,00154	333.0	0,00152
443.0	0,00154	2224	0,00152
5754	0,00154	6151	0,00152
5005	0,00154	2026	0,00152
6082	0,00154	2124	0,00152
5052	0,00154	3004	0,00152
332.0	0,00154	2010	0,00152
8009	0,00153	2008	0,00152
357.0	0,00153	6111	0,00151
150.1	0,00153	6009	0,00151
3105	0,00153	380.0	0,00151
8019	0,00153	383.0	0,00151
6156	0,00153	2524	0,00151
6060	0,00153	6262	0,00151
2618	0,00153	354.0	0,00151
6022	0,00152	6061	0,00151
1200	0,00152	6013	0,00151
1050	0,00152	7249	0,00151
6016	0,00152	319.0	0,00150

2036	0,00150	7020	0,00150
2017	0,00150	7075	0,00149
2014	0,00150		

Fonte: Granta EduPack 2020, 2024, adaptada.

Para o design 1 (seção transversal circular), a variação do índice de mérito (IM) foi de 0,00334 a 0,00304, enquanto para o design 2 (seção transversal retangular), a variação foi de 0,00164 a 0,00149, representando uma diferença de 8,98% e 9,14%, respectivamente. Em ambos os casos, o material com maior IM foi a liga de alumínio 518.0, que se mostrou um forte candidato. Uma liga fundida rica em magnésio.

No entanto, considerando os designs propostos, é essencial que o material selecionado esteja disponível comercialmente na forma de barras cilíndricas ou retangulares. Como as ligas fundidas são comumente comercializadas em tarugos, elas se tornam menos adequadas para esta aplicação.

Segundo Ettore, as ligas de alumínio trabalhadas mais frequentemente encontradas na forma de barras circulares ou poligonais incluem as ligas 2011, 6262, 2117, 6253 e 2024-T4. Esse dado foi confirmado por meio de buscas em sites de vendas de metais¹.

Dessa forma, considerando a base de dados do software Granta EduPack, a liga 2024-T4 se destaca como a melhor opção, pois combina alta disponibilidade comercial com o maior IM entre as opções viáveis. Na condição T4—ou seja, solubilizada e envelhecida naturalmente—essa liga apresenta um IM de $03,12 \cdot 10^{-3}$ para o design 1 e $1,52 \cdot 10^{-3}$ para o design 2, consolidando-se como a escolha ideal para esta aplicação.

A liga 2024 na condição T4 é amplamente utilizada em aplicações estruturais, incluindo em estruturas de aeronaves, devido à sua melhor relação resistência x peso. Como indica a sua nomenclatura, a liga 2024 é uma liga Al-Cu, cuja composição é apresentada na Tabela 6. A Tabela 7 destaca algumas das propriedades da liga mostrando que ela atende às limitações de rigidez impostas no processo de seleção.

¹ Referencias [18], [19], [20].

Além disso, este material é uma opção economicamente acessível.

Tabela 6: Composição da liga 2024.

Al	Cu	Mg	Mn
90,8 - 94,7	3,8 - 4,9	1,2 - 1,8	0,3 - 0,9

Fonte: Granta EduPack 2020, 2024, adaptada.

Tabela 7: Propriedades da liga 2024.

Módulo de Young (GPa)	72 - 77
Tensão de Escoamento (MPa)	248 - 330
Coeficiente de Poisson	0,325 – 0,344
Densidade (g/cm ³)	2,74 - 2,8
Temperatura de Fusão (°C)	500 - 640
Dureza Vickers (HV)	119 - 131
Custo (R\$/kg)	10,9 - 13,2

Fonte: Granta EduPack 2020, 2024, adaptada.

Tendo escolhido o material ideal para o projeto pode-se prosseguir com os cálculos para dimensionamento dos dois designs, conforme as equações (14), (15) e (16) .

Para secção circular:

$$r = \sqrt[4]{\frac{32 * 307 \text{ N} * (200\text{mm})^2}{\pi^3 * 72.000 \text{ MPa}}}$$

$$r = 3,64 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{307 \text{ N}}{\pi * (3,64\text{mm})^2} = 7,38 \text{ MPa} < \sigma_{esc}$$

$$FS = \frac{248\text{MPa}}{7,38\text{MPa}} = 33,60$$

Para a secção retangular:

$$b = \sqrt[4]{\frac{48 * 307 \text{ N} * (200\text{mm})^2}{\pi^2 * 72.000 \text{ MPa}}}$$

$$b = 5,37 \text{ mm}$$

$$h = 10,73 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{307 \text{ N}}{5,37\text{mm} * 10,73\text{mm}} = 5,32 \text{ MPa} < \sigma_{esc}$$

$$FS = \frac{248\text{MPa}}{5,32\text{MPa}} = 46,62$$

A utilização das equações é válida pois a tensão calculada encontra-se dentro do limite de deformação elástica do material. O FS final para os designs apresenta valores bem altos comparados ao estipulado inicialmente. As plantas das peças com as dimensões finais são apresentadas nos apêndices B e C.

Pode-se observar que o critério utilizado para seleção de materiais levou a escolha de um mesmo material para as duas geometrias. Segundo os cálculos abaixo o design 1 apresenta a menor massa e portanto é mais eficiente.

$$m_1 = \pi(3,64\text{mm})^2 * 200\text{mm} * 0,0027 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3} = 22,48\text{g}$$

$$m_2 = 5,37\text{mm} * 10,73\text{mm} * 200\text{mm} * 0,0027 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3} = 31,11\text{g}$$

Para averiguar a deflexão por flexão, considera-se a distancia horizontal entre a roda e a haste da bequilha como 5mm temos:

$$M = 307\text{N} * 5 \text{ mm} = 1.535 \text{ Nmm}$$

Para secção circular:

$$\delta = \frac{1535 \text{ Nmm} * (200\text{mm})^2}{2 * 72 * 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * \frac{\pi * (3,64\text{mm})^4}{4}} = 3,09 \text{ mm}$$

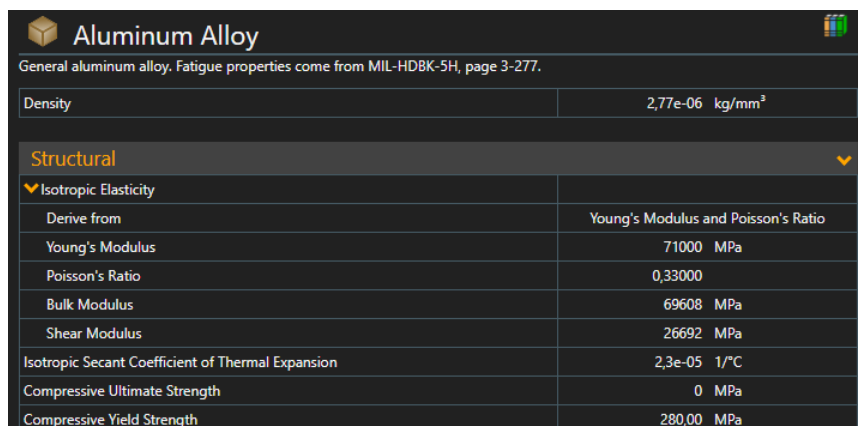
Para secção retangular:

$$\delta = \frac{1535 \text{ Nmm} * (200\text{mm})^2}{2 * 72 * 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * \frac{5,37\text{mm} * (10,73\text{mm})^3}{12}} = 0,77 \text{ mm}$$

A deflexão causada em ambos os casos é mínima, inferior a 5mm e não irá comprometer a funcionalidade da bequilha nem possibilitar que os componentes do avião toquem o chão.

Para a AEF, foi selecionado o material pertencente à biblioteca do software Ansys Workbench com as propriedades apresentadas na Figura 19 semelhantes aos apresentados anteriormente para a liga 2024-T4. Nas Figuras 20 e 22 é possível observar a distribuição das tensões de von Mises obtidas pela análise de MEF, evidenciando que as tensões no modelo se mantiveram abaixo do limite de escoamento da liga utilizada, evidenciando que o dimensionamento foi adequado. As regiões com maiores níveis de tensão são mostradas nas figuras 21 e 23. Em ambas as geometrias de seções transversais analisadas as tensões máximas ocorrem na face interna do furo onde o eixo da roda é fixado, tratando-se claramente de um concentrador de tensões. Como essas tensões máximas ocorreram em poucos elementos da malha (e apenas em alguns nós destes), a malha foi refinada nessas regiões de maneira a verificar o comportamento dessas tensões máximas.

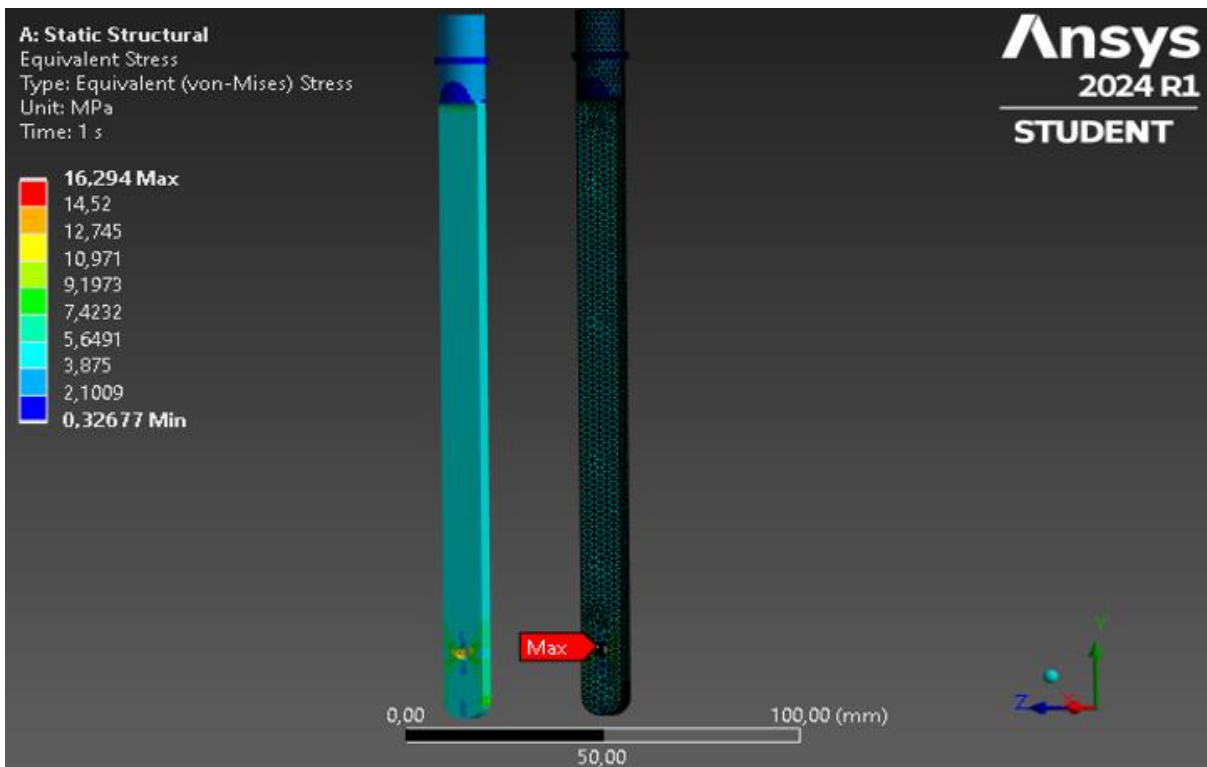
Figura 19 – Propriedades do material utilizado na simulação de elementos finitos.



Aluminum Alloy	
General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.	
Density	2,77e-06 kg/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	71000 MPa
Poisson's Ratio	0,33000
Bulk Modulus	69608 MPa
Shear Modulus	26692 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	2,3e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	280,00 MPa

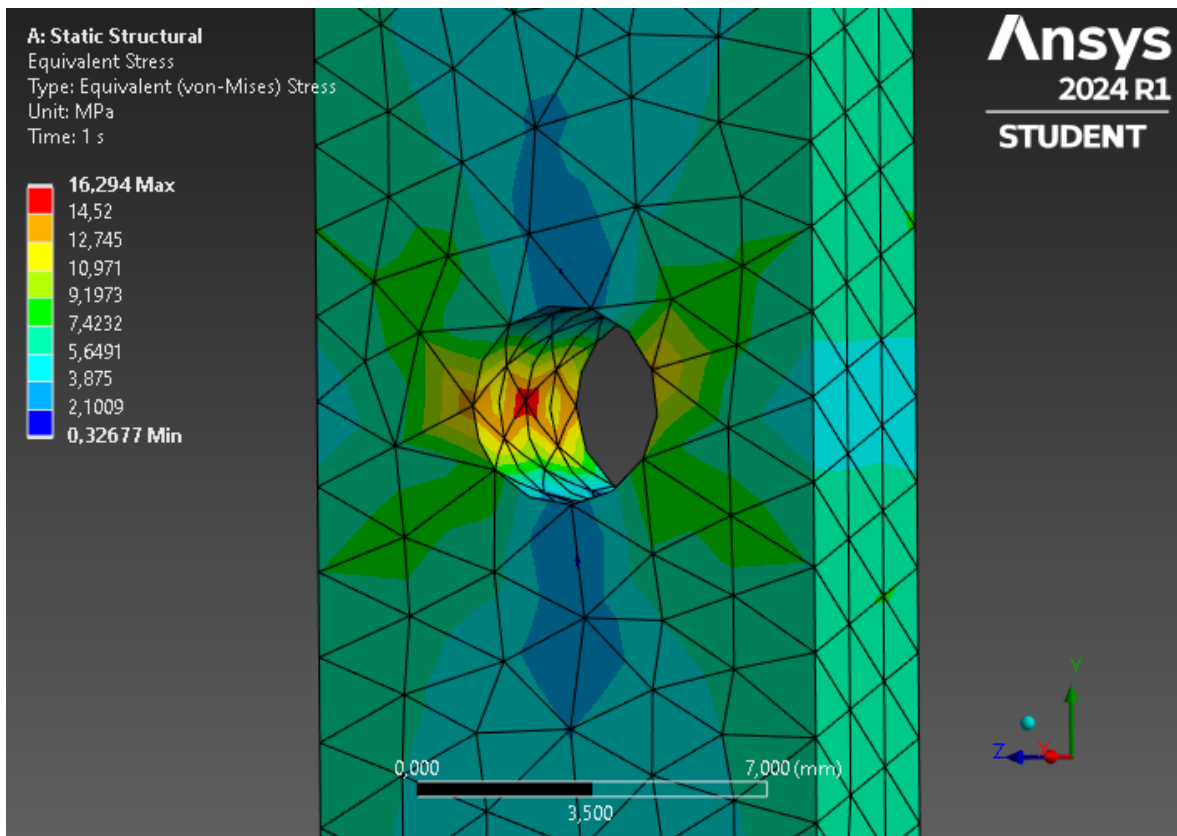
Fonte: Ansys Workbench 2024 R1.

Figura 22 – Distribuição da tensão equivalente de von Mises no design 2.



Fonte: Ansys Workbench 2024 R1.

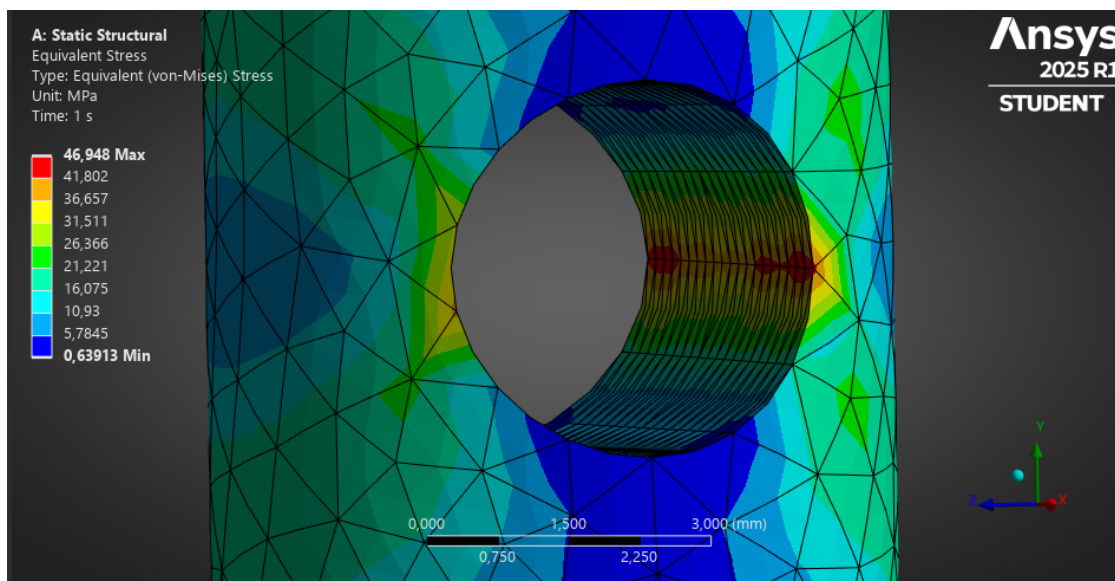
Figura 23 – Região de maior tensão equivalente de von Mises design 2.



Fonte: Ansys Workbench 2024 R1.

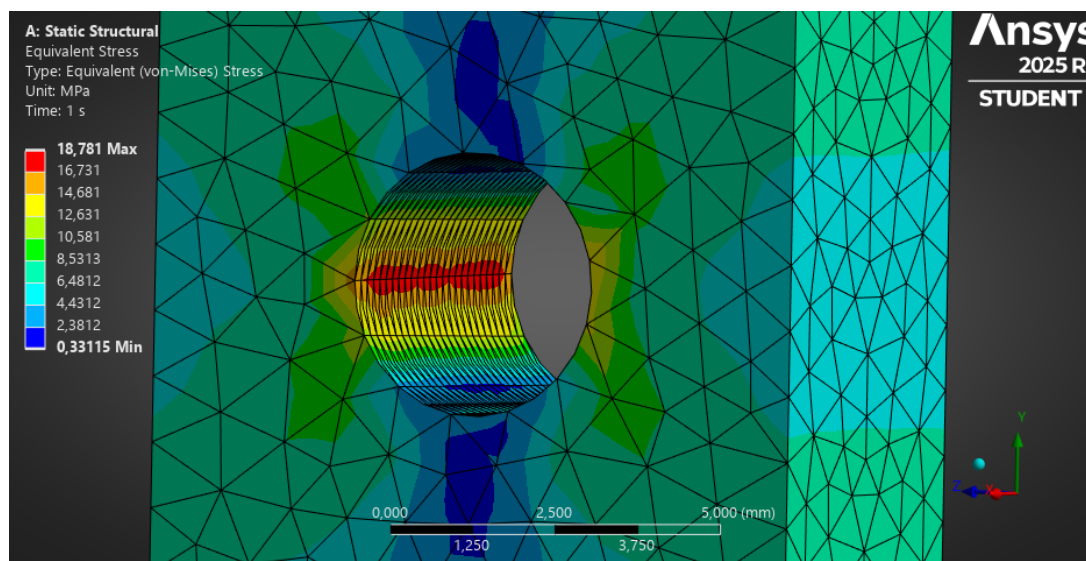
As Figuras 24 e 25 mostram que, mesmo após o refinamento da malha, a região continua a apresentar as maiores tensões, indicando que as tensões nestes locais foram corretamente calculadas pelo software. Além disso, o valor da tensão equivalente de von Mises aumentou ligeiramente com o refinamento, mas permaneceu abaixo da tensão de escoamento do material.

Figura 24 – Refinamento da malha e nova distribuição de tensões na região de concentração de tensão design 1.



Fonte: Ansys Workbench 2025 R1.

Figura 25 – Refinamento da malha e nova distribuição de tensões na região de concentração de tensão design 2.



5 CONCLUSÕES

As etapas desenvolvidas neste trabalho permitiram determinar um material adequado, definir dimensões viáveis e validar a resistência estrutural da bequilha. Os resultados mostraram que tanto a seção transversal circular quanto a retangular atendem às exigências do projeto, sendo a liga 2024-T4 a escolha final devido à sua rigidez, custo acessível e disponibilidade comercial.

A análise estrutural indicou que a geometria estudada oferece uma margem de segurança considerável, com tensões abaixo do limite de escoamento e deflexões bem inferiores ao limite estabelecido. O design com seção circular demonstrou menor massa, tornando-se a opção mais leve sem comprometer a integridade estrutural.

Embora o projeto não tenha sido conduzido para otimizar completamente a minimização de peso, os resultados obtidos fornecem uma base sólida para refinamentos futuros. A metodologia aplicada pode ser expandida para o desenvolvimento de outros componentes da aeronave, auxiliando a equipe Dragão Branco na melhoria contínua de seus projetos.

REFERÊNCIAS

- [1] SAE BRASIL. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/aero-design-sae-brasil/>. Acesso em: 23 dez. 2024.
- [2] SAE INTERNATIONAL. Disponível em: <https://www.sae.org/about/history>. Acesso em: 23 dez. 2024.
- [3] SAE INTERNATIONAL. Disponível em: <https://www.sae.org/attend/student-events/about-aero-design>. Acesso em: 23 dez. 2024.
- [4] RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda José. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho**. 1. ed. Salto, SP, 2014.
- [5] RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda José. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign: Estabilidade e Estruturas**. 1. ed. Salto, SP, 2014.
- [6] ASHBY, Michael. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Tradução de Arlete Simille. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- [7] GRANTA EduPack 2020. **Software**.
- [8] ANSYS. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>. Acesso em: 24 dez. 2024.
- [9] FEDERAL AVIATION REGULATIONS. **FAR PART 23: Airworthiness Standards: normal, utility, acrobatic, and commuter category airplane**. Estados Unidos, 2011.
- [10] HIBBELER, R. C. **Mechanics of Materials: Tenth Edition in SI Units**. 10. ed. Pearson, 2018.
- [11] SAFETY CULTURE. Disponível em: <https://safetyculture.com/topics/factor-of-safety/>. Acesso em: 27 dez. 2024.
- [12] Autodesk Inventor Professional 2025. **Software**.
- [13] CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA. Disponível em: <https://crqsp.org.br>. Acesso em: 31 dez. 2024.
- [14] GOOGLE. Disponível em: <https://www.google.com.br/?hl=pt-BR>. Acesso em: 31

dez. 2024.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Disponível em: <https://abal.org.br>. Acesso em: 07 jan. 2025.

[16] INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. Disponível em: <https://international-aluminium.org/>. Acesso em: 07 jan. 2025.

[17] FILHO, Ettore Bresciani. **Seleção de metais não ferrosos**. Cap. 2. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 1992.

[18] ONLINE METALS. Disponível em: <https://www.onlinemetals.com/en/buy/aluminum>. Acesso em: 08 jan. 2025.

[19] METALS SUPERMARKETS. Disponível em: <https://www.metalsupermarkets.com/metals/aluminum-round-bar/>. Acesso em: 08 jan. 2025.

[20] AÇOS NOBRE. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/metais-nao-ferrosos/aluminio-6351-t6/>. Acesso em: 08 jan. 2025.

[21] ANSYS. Disponível em: <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-finite-element-analysis>. Acesso em: 12 jan. 2025.

[22] GUTERRES, A. M. et al. **Desenvolvimento de modelo numérico para ser utilizado como ferramenta didática no processo de ensino-aprendizagem na disciplina de resistência dos materiais**. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, [s.l.], v. 17, n. 9, p. e10223, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.9-039. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/10223>. Acesso em: 12 jan. 2025.

[23] TRUCHLAEFF, Mateus. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=KPiQzs6jBR8>. Acesso em: 12 jan. 2025.

[24] Ansys Workbench 2024 R1. **Software**.

[25] Ansys Workbench 2025 R1. **Software**.

[26] GAARDER, Jostein. **O mundo de Sofia: romance da história da filosofia**. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

APÊNDICE A - Considerações de dimensionamento do design 2

Se tomarmos um círculo de raio 5mm e quisermos inscrever um retângulo em seu interior de base igual a metade do raio conforme a figura pode-se determinar a sua altura segundo o teorema de Pitágoras como:

$$5^2 = 2,5^2 + x^2$$

$$x \approx 4,3$$

$$h = 2 \cdot x$$

$$h \approx 8,6 \text{ mm}$$

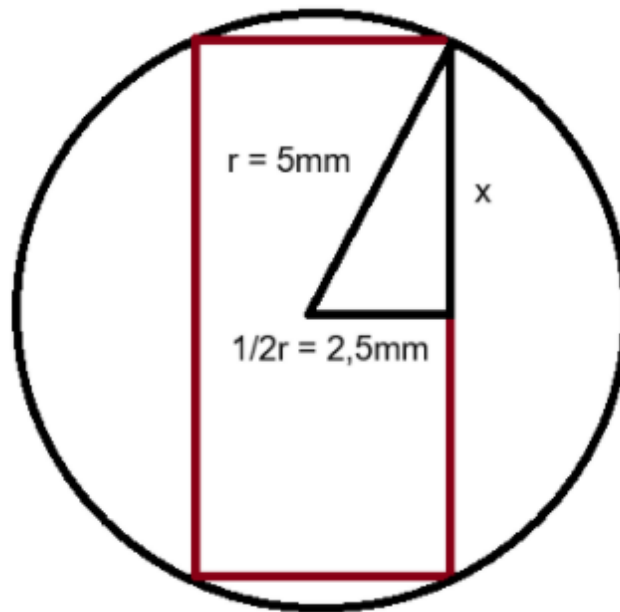


Figura A1: Esquema de retângulo inscrito em uma circunferência.

APÊNDICE B – Planta design 1

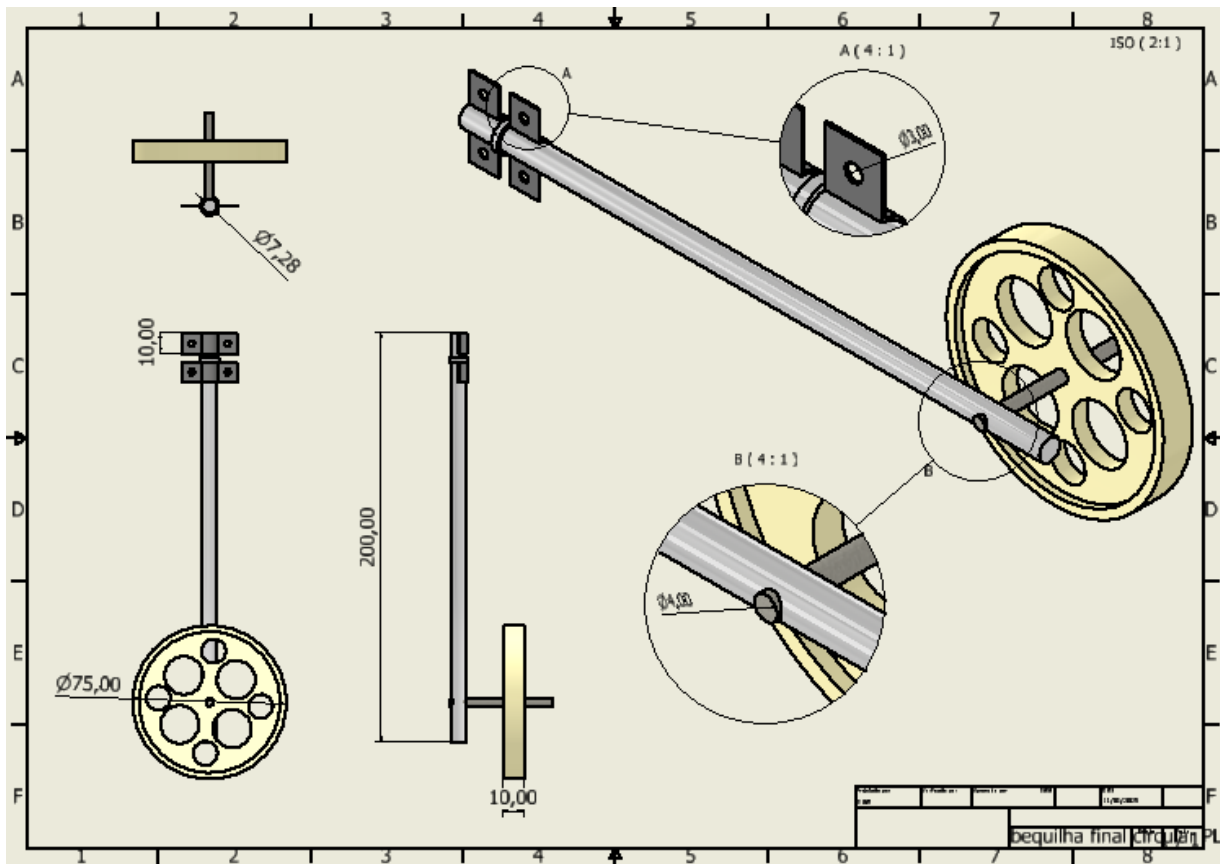


Figura B1: Planta design 1.

APÊNDICE C – Planta design 2

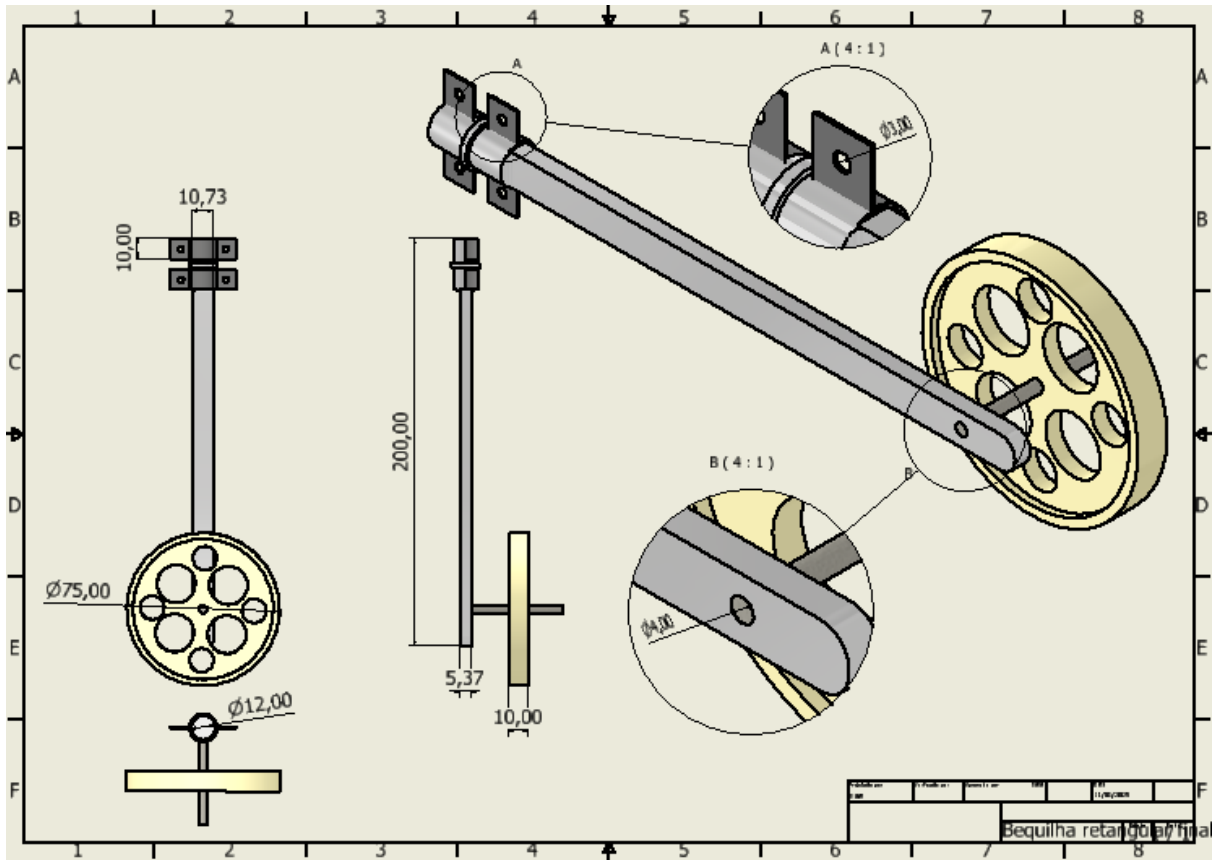


Figura C1: Planta design 2.