



**Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Mecânica**

PROJETO DE TCC:

**DESENVOLVIMENTO DAS RODAS DO CONJUNTO DE TREM DE POUSO DE UM
AERODESIGN UTILIZANDO TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA**

ALUNO:

Kenenton Kenedy Fabricio da Silva

PROFESSOR ORIENTADOR:

Ramiro Brito Willmersdorf

**Recife - PE
2024**

KENENTON KENEDY FABRICIO DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DAS RODAS DO CONJUNTO DE TREM DE POUSO DE UM
AERODESIGN UTILIZANDO TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica.

Orientador: Ramiro Brito Willmersdorf

Recife - PE

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Kenenton Kenedy Fabricio da.

Desenvolvimento das rodas do conjunto de trem de pouso de um aerodesign utilizando técnica de otimização topológica / Kenenton Kenedy Fabricio da Silva. - Recife, 2024.

54 p : il., tab.

Orientador(a): Ramiro Brito Willmersdorf

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2024.

9,5.

Inclui referências.

1. Otimização Topológica. 2. Simulação Estrutural. 3. Elementos Finitos. 4. Trem de Pouso Aeronáutico. 5. AeroDesign. I. Willmersdorf, Ramiro Brito . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

*"A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original."*

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta jornada, expresso meu sincero agradecimento a todos que estiveram ao meu lado.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela oportunidade, pela força de vontade e por me acompanhar em tudo que passou e ainda virá.

À minha família e amigos, em especial a Cleciane Cristina da Silva, Walter Fabricio da Silva, Pedro Henrique dos Santos Silva e Amaro José da Silva, meu profundo agradecimento pelo apoio constante ao longo de toda a trajetória.

Em memória de Maria José da Silva, que desde a infância esteve ao meu lado e permanecerá viva em meu coração.

A todos os amigos que fiz ao longo do curso, agradeço pela troca de ideias, companheirismo e cada momento compartilhado.

Aos professores que compartilharam conhecimentos, desafios e experiências ao longo da minha jornada acadêmica, agradeço pelo estímulo constante ao pensamento crítico e pelo ambiente propício ao aprendizado. Em especial ao Prof. Ramiro Brito Willmersdorf, meu orientador neste trabalho, que desempenhou essa função com dedicação.

À Universidade Federal de Pernambuco, agradeço pelo ensino gratuito e apoio financeiro através da assistência estudantil, proporcionando não apenas uma educação de qualidade, mas também oportunidades para desenvolver habilidades essenciais para minha carreira.

RESUMO

A competição SAE BRASIL AeroDesign é um evento anual que reúne equipes de estudantes universitários, visando promover a troca de técnicas e conhecimentos em engenharia aeronáutica através do desenvolvimento de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) de pequeno porte. Essas aeronaves possuem os principais componentes de aeronaves comerciais. Entre esses componentes, o trem de pouso destaca-se como crítico, pois aproximadamente 55% das falhas em aeronaves ocorrem durante as fases de pouso e decolagem. O correto dimensionamento desse conjunto é crucial para garantir um nível adequado de segurança e desempenho, sem a adição excessiva de peso à aeronave. Por isso, a utilização de ferramentas de simulação numérica é essencial, permitindo obter estimativas do comportamento de componentes estruturais por meio de modelagem física. Em 2022, a equipe Mandacaru AeroDesign da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) participou da 24ª Competição SAE BRASIL AeroDesign, apresentando um projeto de aeronave equipada com um trem de pouso triciclo composto por rodas de liga de alumínio. Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento otimizado das rodas do conjunto de trem de pouso de uma AeroDesign. A abordagem envolve a aplicação do método de elementos finitos em conjunto com a técnica de otimização topológica, visando garantir um desempenho eficiente da aeronave por meio de componentes leves e seguros. Como resultado, obteve-se uma geometria otimizada com massa reduzida para as rodas do trem de pouso principal, com 17,12 g (uma redução de 57,80%) e para as rodas do trem de pouso frontal, com 10,82 g (uma redução de 73,26%). Esses resultados refletem uma melhoria significativa em relação ao projeto utilizado pela equipe em 2022, representando uma contribuição importante para o desempenho global da aeronave. Além da redução de peso, os componentes otimizados mantêm o nível de segurança e confiabilidade exigido para suportar as operações de pouso e decolagem, validando a eficácia da metodologia aplicada.

Palavras-chave: Otimização Topológica; Simulação Estrutural; Elementos Finitos; Trem de Pouso Aeronáutico; AeroDesign;

ABSTRACT

The SAE BRASIL AeroDesign competition is an annual event that brings together university student teams to promote the exchange of techniques and knowledge in aeronautical engineering through the development of small Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). These aircraft include the main components of commercial airplanes, with the landing gear standing out as critical, since approximately 55% of aircraft failures occur during landing and takeoff phases. Proper design of this system is crucial to ensure an adequate level of safety and performance without adding excessive weight to the aircraft. Therefore, the use of numerical simulation tools is essential, as they allow for estimates of structural component behavior through physical modeling. In 2022, the Mandacaru AeroDesign team from the Federal University of Pernambuco (UFPE) participated in the 24th SAE BRASIL AeroDesign Competition, presenting an aircraft project equipped with a tricycle landing gear composed of aluminum alloy wheels. In this context, this work proposes the optimized development of the wheels for an AeroDesign landing gear system. The approach involves applying the finite element method together with the topology optimization technique to ensure efficient aircraft performance through lightweight and safe components. As a result, an optimized geometry with reduced mass was obtained for the main landing gear wheels, weighing 17.12 g (a 57.80% reduction), and for the nose landing gear wheels, weighing 10.82 g (a 73.26% reduction). These results represent a significant improvement over the design used by the team in 2022, making a valuable contribution to the overall performance of the aircraft. In addition to weight reduction, the optimized components maintain the necessary level of safety and reliability to withstand landing and takeoff operations, validating the effectiveness of the applied methodology.

Keywords: Topological Optimization; Structural Simulation; Finite Elements; Aircraft Landing Gear; AeroDesign.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes estruturais de uma aeronave.	16
Figura 2 - Exemplos das formas construtivas das estruturas da fuselagem.....	17
Figura 3 - Principais formas geométricas das asas.....	17
Figura 4 - Modelo de empenagem convencional.....	18
Figura 5 - Grupo motor-propulsor.....	19
Figura 6 - Configurações de trem de pouso.	20
Figura 7 - Visão explodida do (a) trem de pouso principal e (b) trem de pouso frontal.	21
Figura 8 - Situações de pouso.....	21
Figura 9 - Similaridade entre um objeto e uma mola carregados axialmente.....	22
Figura 10 - Elemento linear de barra em série com rigidez, deslocamentos e forças diferentes.....	23
Figura 11 - Gráfico de Convergência da tensão em função do número de nós.	24
Figura 12 - Tipos e ordens dos elementos.	25
Figura 13 - Passos para a formulação do problema de otimização.....	26
Figura 14 - Exemplo de otimização topológica bidimensional.	27
Figura 15 - Procedimento típico de projeto estrutural por otimização topológica.	28
Figura 16 - Otimização topológica do braço de suspensão dianteira de um caminhão.	29
Figura 17 - Viga carregada otimizada.	30
Figura 18 - Exemplo de variáveis de projeto em otimização de forma.	32
Figura 19 - Processo típico de otimização de forma.	32
Figura 20 - Exemplo de Otimização Paramétrica.	33
Figura 21 - Aeronave da equipe Mandacaru Aerodesign de 2022.	34
Figura 22 - Rodas da aeronave da Equipe Mandacaru Aerodesign utilizadas em 2022.	35
Figura 23 - Geometria não otimizada.	36
Figura 24 - Condições de contorno nas rodas (a) do trem de pouso principal e (b) trem de pouso frontal.....	37
Figura 25 - Malha em vista isométrica das rodas do (a) trem de pouso principal e (b) trem de pouso frontal.	38

Figura 26 - Objetivo e restrições de otimização topológica das rodas do (a) trem de pouso principal e (b) trem de pouso frontal.	39
Figura 27 - Tensões de von Misses nas rodas do trem de pouso principal (a) vista isométrica e (b) vista frontal.	42
Figura 28 - Tensões de von Misses na roda do trem de pouso frontal (a) vista isométrica e (b) vista frontal.	43
Figura 29 - Vista (a) isométrica e vista (b) frontal trem de pouso principal.....	44
Figura 30 - Vista (a) isométrica e vista (b) frontal trem de pouso frontal.	44
Figura 31 - Vista (a) isométrica e vista (b) frontal da roda otimizada do trem de pouso principal.....	45
Figura 32 - Vista (a) isométrica e vista (b) frontal da roda otimizada do trem de pouso frontal.	45
Figura 33 - Estudo de convergência de malha na roda do trem de pouso principal. .	47
Figura 34 - Estudo de convergência de malha na roda do trem de pouso frontal.	47
Figura 35 - Tensões de von Misses nas rodas otimizadas do trem de pouso principal (a) vista isométrica e (b) vista frontal.....	48
Figura 36 - Região de concentração de tensão de von Misses na roda otimizada do trem de pouso principal.	48
Figura 37 - Tensões de von Misses na roda do trem de pouso frontal (a) vista isométrica e (b) vista frontal.	49
Figura 38 - Região de concentração de tensão de von Misses na roda otimizada do trem de pouso frontal.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da liga de alumínio 7075-T6.....	36
Tabela 2 - Cargas no Trem de Pouso.....	38
Tabela 3 – Função objetivo, seus parâmetros e restrições.	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	TRABALHOS CORRELATOS	14
2.2	AERONAVES	16
2.2.1	Fuselagem	16
2.2.2	Asas	17
2.2.3	Empenagem	18
2.2.4	Grupo Motor-Propulsor	18
2.2.5	Trem De Pouso	19
2.3	CARGAS ATUANTES	21
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	22
2.4.1	Malha	23
2.4.2	Tipos De Elementos	24
2.5	OTIMIZAÇÃO	25
2.5.1	Otimização Topológica	27
2.5.1.1	SOLID ISOTROPIC MATERIAL WITH PENALIZATION (SIM).....	30
2.5.2	Otimização De Forma	31
2.5.3	Otimização Paramétrica	33
3	METODOLOGIA	34
3.1	AERONAVE.....	34
3.2	GEOMETRIA	35
3.3	MATERIAL.....	36
3.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO	37
3.5	MALHA	38
3.6	ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA	39
3.7	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	39
3.8	VALIDAÇÃO DO PROJETO OTIMIZADO	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA	42
4.2	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO T'OPOLÓGICA.....	43

4.3	SUAVIZAÇÃO DA GEOMETRIA OTIMIZADA.....	45
4.4	RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA DAS GEOMETRIAS OTIMIZADAS.....	46
5	CONCLUSÕES.....	50
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	50
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Em 1986, a SAE International, nos Estados Unidos, deu origem à competição que viria a se tornar o programa Competição SAE BRASIL AeroDesign. Integrando o calendário de Programas Estudantis da SAE BRASIL em 1999, essa competição se estabeleceu como um desafio voltado aos estudantes de Engenharia. Seu principal propósito é promover a disseminação e a troca de técnicas e conhecimentos em Engenharia Aeronáutica. A competição envolve equipes compostas por estudantes universitários que, por meio de aplicações práticas, concebem, constroem e testam Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS).

Os VANTS são projetados para reproduzir as características de voo e aparência, seguindo os mesmos conceitos de que norteiam a construção de aviões comerciais. Os componentes principais da estrutura de um avião são asas, fuselagem, empenagem, grupo motor-propulsor e trem de pouso (RODRIGUES, 2014). Este trabalho se restringiu as rodas do conjunto de trem de pouso.

De acordo com Holzmann e Dallamuta (2021), o trem de pouso é um dos sistemas mais críticos de uma aeronave, uma vez que, durante o momento de pouso, faz a primeira interação da aeronave com o solo, sendo responsável por suportar grande parte da carga de impacto. Diante disso, garantir que o conjunto de trem de pouso atenda aos requisitos de confiabilidade e segurança é uma etapa fundamental em um projeto aeronáutico. De acordo com a FAA (2012), cerca de 55% das falhas ocorridas em aeronaves acontecem durante as fases de decolagem e pouso. Nesse contexto, ferramentas de simulações numéricas como o método dos elementos finitos (finite element analysis – FEA) são meios que podem fornecer estimativas sobre o comportamento de um componente em situações de estresse e tensão a partir de modelagem de suas características físicas e de seus mecanismos de falha (DU, ZHANG e ZHANG, 2019).

Em uma aeronave, é crucial que os componentes de seus sistemas possuam a robustez necessária para garantir um nível adequado de segurança e desempenho em sua função específica, sem adicionar um aumento excessivo no peso da aeronave (HOLZMANN e DALLAMUTA, 2021). Nesse contexto, a técnica de otimização topológica é uma ferramenta poderosa de projeto, cujo objetivo é projetar estruturas eficientes através da distribuição mais otimizada de material na região de otimização (BENDSOE e SIGMUND, 2003). Dessa maneira, torna-se possível projetar

componentes mais leves, reduzindo o peso da aeronave sem comprometer as resistências estruturais necessárias.

Nesse sentido, este trabalho propõe o desenvolvimento das rodas do conjunto de trem de pouso de um AeroDesign, utilizando ferramentas computacionais para a avaliação estrutural. O foco reside na otimização do componente por meio da técnica de otimização topológica, visando a redução de massa e garantindo sua integridade estrutural. Este processo visa garantir a obtenção de rodas leves e seguras. Além disso, este trabalho também será uma contribuição para aqueles que desejarem reproduzir componentes estruturais otimizados.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento das rodas do conjunto trem de pouso de um AeroDesign através da técnica de otimização topológica, buscando reduzir a massa do componente sem comprometer sua integridade estrutural.

Como objetivos específicos podem-se citar:

- a) Modelagem das rodas do conjunto de trem de pouso de um AeroDesign utilizando o *software ANSYS SpaceClaim*.
- b) Análise estrutural da geometria em sua condição crítica de uso, que ocorre durante o pouso sob uma única roda, visando obter a distribuição de tensões.
- c) Aplicação da técnica de otimização topológica na geometria modelada buscando reduzir a massa do componente sem comprometer sua integridade estrutural.
- d) Reconstrução da geometria com base na otimização realizada.
- e) Validação da estrutura otimizada por meio de análises estruturais simulando sua condição crítica de uso.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, conduziu-se uma pesquisa bibliográfica com o propósito de apresentar os fundamentos essenciais para embasar o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, serão abordados trabalhos correlatos. Na sequência, serão discutidos os principais conceitos relacionados a aeronaves e seus componentes, bem como as cargas que incidem sobre as rodas do conjunto de trem de pouso. Adicionalmente, serão explorados o método dos elementos finitos e as técnicas de otimização estruturais. Este conjunto de informações proporcionará uma base teórica robusta para a compreensão e análise aprofundada dos temas abordados no decorrer deste trabalho.

2.1 TRABALHOS CORRELATOS

Goyal (2002) realizou um projeto de desenvolvimento para o trem de pouso principal de uma aeronave leve, utilizando material compósito de fibra de vidro e utilizando o método de elementos finitos. A análise do componente foi realizada simulando a condição crítica de pouso, avaliando tensões e deformações para prever o comportamento do trem de pouso antes da fabricação.

Os resultados do estudo concluíram que a utilização de fibra de vidro é tão segura quanto o uso de metal em termos de desempenho. Além disso, foi possível alcançar uma redução de peso do componente em 13 vezes em comparação com o uso de material metálico.

Alberti, Araújo e Gentili (2007) empregaram a técnica de elementos finitos para conduzir análises de tensões, considerando os efeitos do carregamento dinâmico em um trem de pouso de um aeromodelo durante a aterrissagem. O objetivo era validar a ocorrência de deformação plástica no componente, observada durante a competição, por meio das análises computacionais.

Na abordagem adotada pelos autores, a modelagem da aeronave assume-a como uma massa homogênea, caracterizada por rigidez infinita e distribuição uniforme sobre o trem de pouso. A análise desconsidera a absorção de impacto pelos pneus e rodas do trem de pouso, focando exclusivamente no impacto absorvido pela estrutura. Quanto ao engastamento da lâmina estrutural do trem de pouso à fuselagem, optou-se por totalmente engastada.

A análise revelou que a deformação plástica no trem de pouso foi resultado do excesso de carga durante a competição, ultrapassando a capacidade de resistência do material.

Assumpção et al. (2011) apresentaram uma metodologia para desenvolver um trem de pouso mais leve em uma aeronave radiocontrolada. Utilizando o método de elementos finitos e técnicas de otimização na linguagem Ansys Parametric Design Language (APDL), os pesquisadores buscaram determinar as dimensões ideais do componente. A estratégia envolveu a criação de uma estrutura tipo sanduíche, combinando materiais compósitos com fibras de aramida bidirecionais no núcleo e fibras de carbono unidirecionais nas regiões superior e inferior. Os resultados demonstraram uma redução de 73% em peso em comparação com o trem de pouso anterior.

Souza et al. (2013) realizaram um projeto de desenvolvimento de uma roda de um aeromodelo radiocontrolado por meio da técnica de otimização topológica utilizando o software Ansys em conjunto com algoritmos genéricos e métodos estatísticos do Software ModeFrontier.

Na abordagem metodológica, optaram por um modelo 2D para a otimização topológica, visando uma distribuição eficiente da massa do componente. Além disso, aplicaram condições de contorno, como restrições nos nós do furo central e uma pressão distribuída ao longo da pista externa da roda. Utilizaram a liga de alumínio 7075-T6 como material.

O resultado do trabalho foi uma redução de 63,8% no volume em comparação com as rodas do projeto anterior.

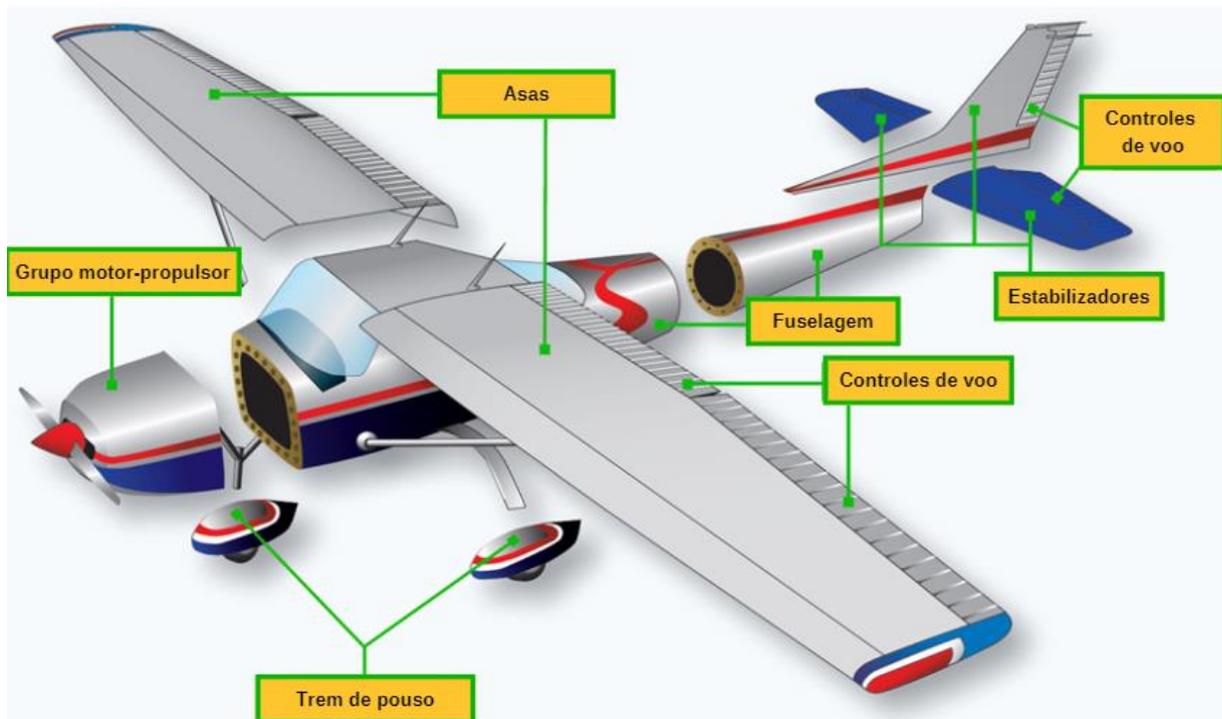
Neto et al. (2022) realizaram uma otimização paramétrica nas rodas traseiras e dianteiras do trem de pouso de uma aeronave da SAE Brasil AeroDesign considerando sua condição crítica que é ao pouso em apenas uma roda. Os autores utilizaram o método de elementos finitos em conjunto com o *Multiple-objective genetic algorithm* (MOGA), variando parâmetros geométricos de modo a obter a melhor combinação que garantisse a resistência necessária com o mínimo de massa.

O trabalho resultou em uma redução da massa em 54,18% nas rodas traseiras e 70,98 nas rodas dianteiras.

2.2 AERONAVES

A definição de aeronaves, conforme apresentada pelo Dicionário Michaelis (2022), engloba todos os aparelhos de navegação aérea destinados ao transporte de pessoas ou objetos. O projeto de uma aeronave é intrinsecamente influenciado pelos seus objetivos operacionais, sendo que todos compartilham uma estrutura básica composta por elementos como asas, fuselagem, grupo motor-propulsor, empenagem e trem de pouso. A forma e as dimensões desses componentes são determinadas pelas exigências específicas de cada tipo de aeronave (RODRIGUES, 2014). A Figura 1 apresenta os principais componentes de uma aeronave.

Figura 1 - Componentes estruturais de uma aeronave.



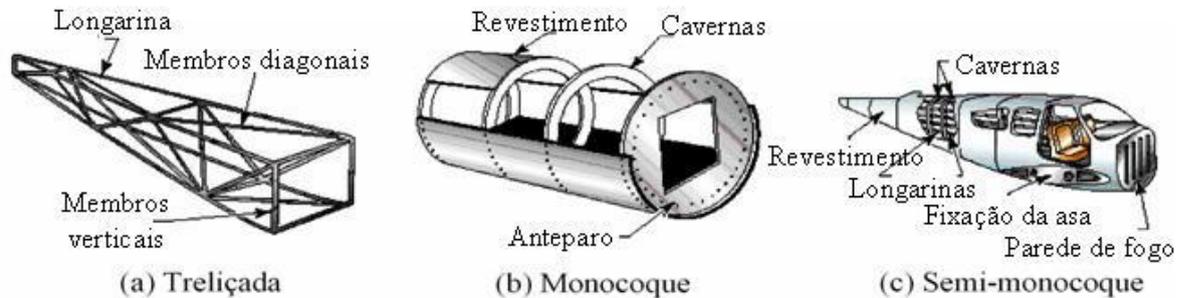
Fonte: Adaptado de Federal Aviation Administration/Aviation Supplies & Academics (2021).

2.2.1 Fuselagem

De acordo com Rodrigues (2014), a fuselagem é a estrutura principal de uma aeronave responsável por sustentar e integrar os principais componentes do avião. Essa estrutura é responsável por acomodar os assentos dos ocupantes, os controles de voo da aeronave e a carga transportada. Além disso, a fuselagem pode ser

concebida sob diferentes configurações, tais como estrutura treliçada, monocoque ou semi-monocoque, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Exemplos das formas construtivas das estruturas da fuselagem.

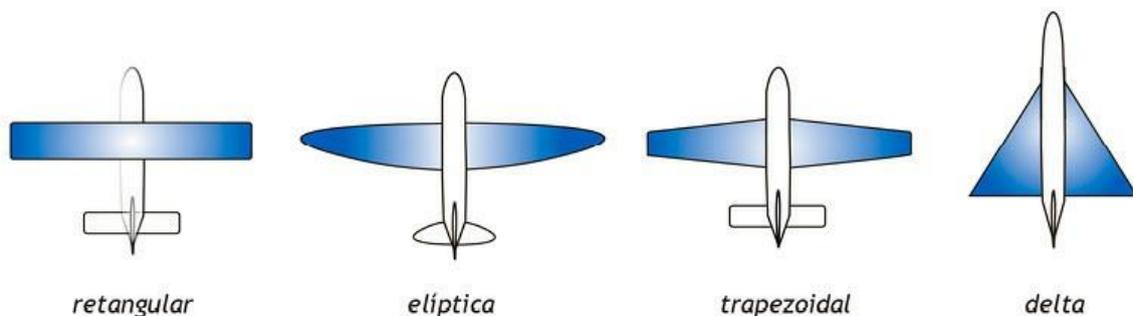


Fonte: Rodrigues (2014).

2.2.2 Asas

As asas são superfícies unidas a fuselagem cuja função é gerar a força de sustentação necessária para manter a aeronave no ar. Além da sustentação, as asas também desempenham um papel importante no controle da aeronave. A quantidade de asas, forma de fixação na fuselagem, tamanho e formato são definidos de acordo com as características de voo desejadas. As geometrias retangular, trapezoidal, elíptica e delta, conforme ilustrado na Figura 3, são as mais comuns em projetos aeronáuticos.

Figura 3 - Principais formas geométricas das asas.

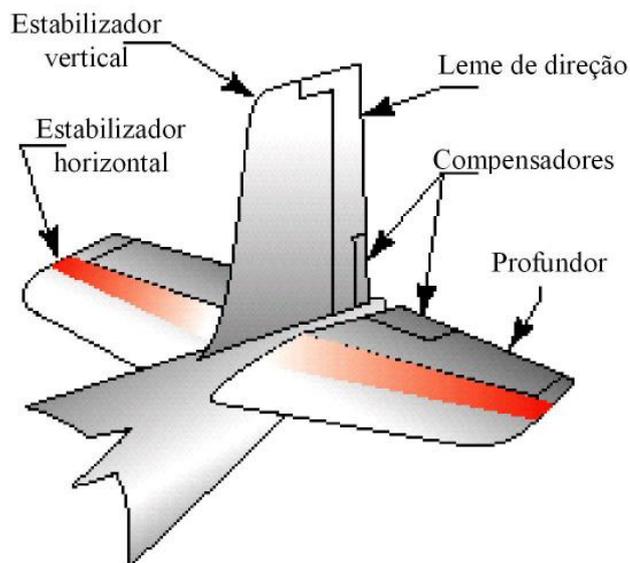


Fonte: Bianchini (2015).

2.2.3 Empenagem

A empenagem é a estrutura traseira de uma aeronave composta por várias superfícies cuja função é estabilizar e controlar a aeronave durante o voo. As superfícies horizontais são responsáveis pelo controle longitudinal por meio do profundor, permitindo ajustes nos movimentos de arfagem, (levantar e abaixar o nariz) da aeronave. Já as superfícies verticais, por sua vez, são responsáveis pelos movimentos de guinada (deslocamento do nariz para esquerda ou para a direita) da aeronave. A Figura 4 apresenta um modelo de empenagem convencional.

Figura 4 - Modelo de empenagem convencional.

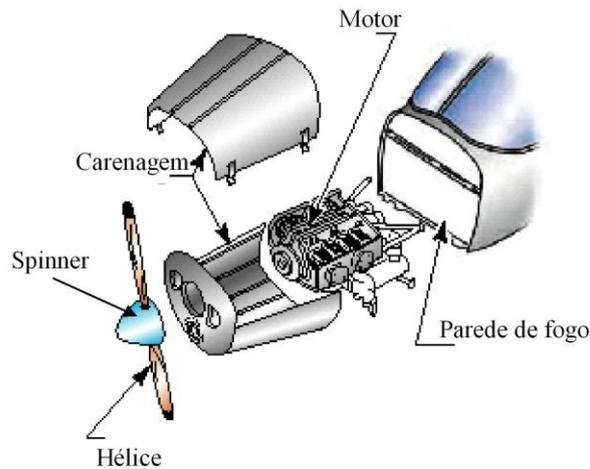


Fonte: Rodrigues (2014).

2.2.4 Grupo Motor-Propulsor

De acordo com Bianchini (2015), a função do grupo motor-propulsor é gerar a tração necessária para impulsionar o avião durante o voo. Esse efeito se dá por meio da transmissão de potência do motor para a hélice que gera a tração de voo da aeronave. A Figura 5 ilustra os principais componentes do grupo motor-propulsor.

Figura 5 - Grupo motor-propulsor.



Fonte: Rodrigues (2014).

2.2.5 Trem De Pouso

De acordo com Rodrigues (2014), as principais funções de um trem de pouso de um avião consiste em apoiar a aeronave sobre o solo, realizar o controle direcional no solo durante a taxiamento, bem como nos momentos críticos de decolagem e amortecimento de impacto durante o pouso. Dentre os componentes de uma aeronave, o trem de pouso é, na maioria das vezes, o componente que causará mais problemas ao engenheiro em um projeto aeronáutico (RAYMER, 2012).

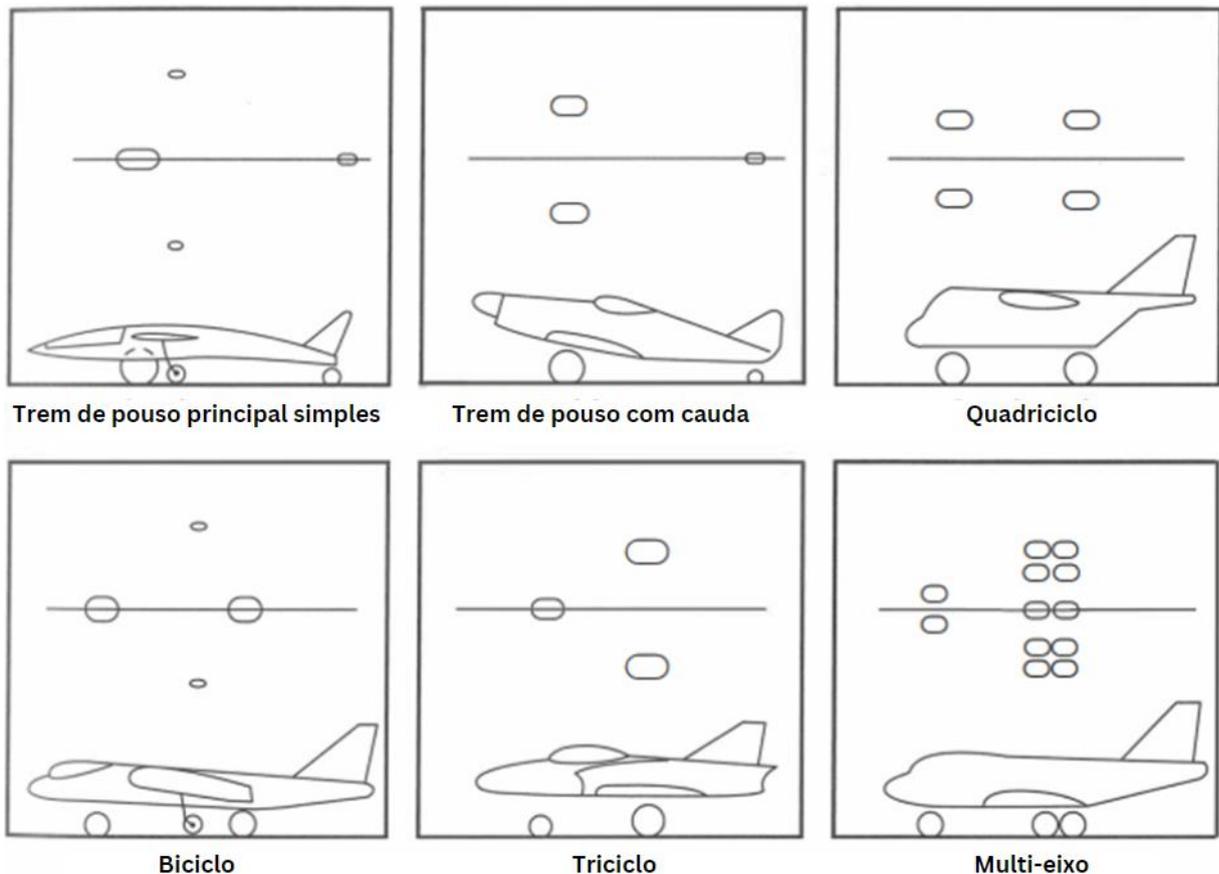
A função principal do trem de pouso é absorver a energia no momento do impacto durante o pouso. Nesse processo, parte dessa energia é dissipada pelo atrito das rodas com o solo, bem como pelos amortecedores ou pela deformação elástica da estrutura do trem de pouso (ROSKAM, 1958).

A FAA (2012) diz que o trem de pouso deve ser resistente o bastante para aguentar o pouso da aeronave totalmente carregada. Além disso, o grande objetivo do projeto é deixá-lo o mais leve possível, uma vez que o peso total de uma aeronave é um fator crítico para o seu desempenho geral. Para atingir isso, várias opções de materiais são utilizadas. Segundo Raymer (2012), a liga de alumínio 7075-T6 é a mais utilizada em aeronaves devido sua relação resistência-peso, custo e resistência à corrosão química.

O trem de pouso pode ter várias configurações, dependendo das necessidades do projeto aeronáutico. A Figura 6 ilustra diferentes disposições de trens de pouso. De

acordo com Raymer (2012), a configuração "triciclo" é a mais comumente usada hoje em dia devido à estabilidade que proporciona à aeronave no solo, permitindo o pouso com um ângulo de "crab" (nariz não alinhado com a pista). Nessa configuração, as duas rodas principais ficam atrás do centro de gravidade, e uma roda auxiliar fica à frente (também chamada de bequilha).

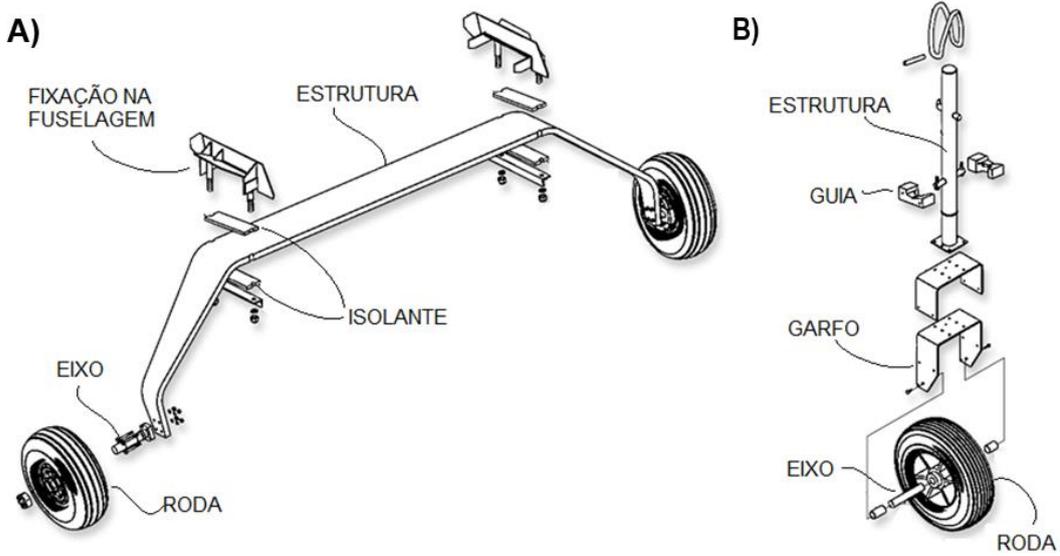
Figura 6 - Configurações de trem de pouso.



Fonte: Adaptado de Raymer (2012).

O conjunto trem de pouso pode ser classificado como fixo, retrátil ou semi-retrátil. Aeronaves maiores geralmente possuem trem de pouso retrátil, melhorando a aerodinâmica e permitindo alcançar maiores velocidades, embora seja mais pesado. Aeronaves menores, por sua leveza, adotam frequentemente o trem de pouso fixo (NASA, 1999). A Figura 7 mostra os componentes do trem de pouso triciclo fixo.

Figura 7 - Visão explodida do (a) trem de pouso principal e (b) trem de pouso frontal.

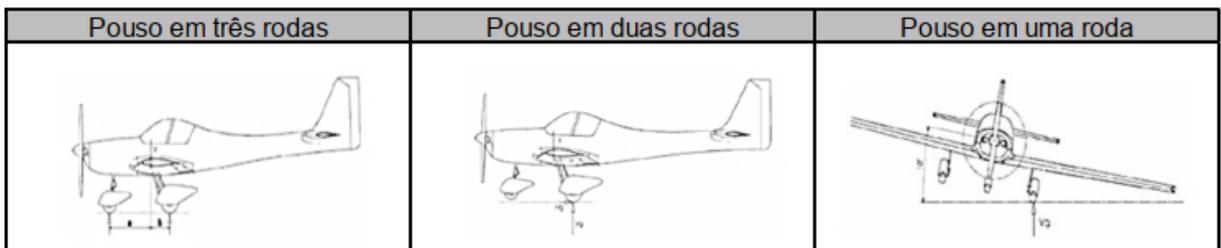


Fonte: Adaptado de Abeling (2016).

2.3 CARGAS ATUANTES

Durante o pouso de uma aeronave, a carga principal no trem de pouso é vertical, resultante do peso da aeronave. Embora a carga vertical seja crucial, há situações menos favoráveis, como pousos em uma única roda ou inclinados (RAYMER, 2012). A norma FAR-PART 23 (Regulamentação Federal de Aviação) (2002) considera três possibilidades de pouso: em três rodas, em duas rodas e em uma única roda do trem principal, sendo esta última a mais crítica. Para a situação do pouso em uma roda, as cargas verticais vêm da gravidade, as longitudinais do atrito com o solo e as laterais devido às inclinações no pouso conforme descritos por Raymer (2012). A Figura 8 ilustra as principais situações de pouso.

Figura 8 - Situações de pouso.



Fonte: Adaptado de Abeling (2016).

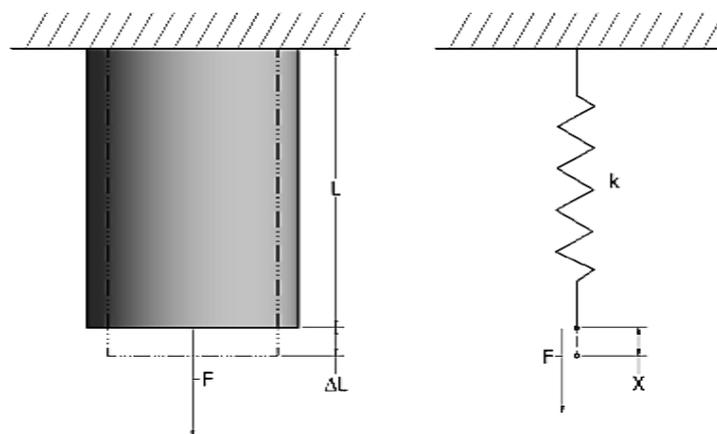
2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos é um método computacional para a resolução de problemas de engenharia através da subdivisão da estrutura em um número finito de elementos conectados por nós para resolução de um conjunto de equações aplicadas sobre cada nó que conecta os elementos representando toda estrutura. (NARASIAH, 2021). A representação da geometria discretizada em elementos conectados por nós é chamada de malha (FISH E BELYTCHKO, 2007).

Esse método é amplamente utilizado na engenharia devido à facilidade de representação dos diversos componentes de máquinas que possuem geometrias complexas com auxílio de *softwares* CAD (desenho com o auxílio de computador), simplificando o processo de obtenção das tensões e deformações dos componentes (BUDYNAS e NISBETH, 2011).

A discretização consiste na subdivisão da geometria de uma peça, originalmente continua, em pequenos elementos, em uma quantidade finita, conectados pelos nós cuja montagem desses elementos constitui o modelo matemático (FILHO, 2018). Esse conjunto de elementos é chamado de malha, ao qual, cada elemento possui rigidez e tamanho pré-definidos análogos a uma mola que contribui para a formação das matrizes em termos de carregamento, deslocamento e rigidez, cuja rigidez depende das propriedades do material e geometria do componente (Figura 9), representando-o uma aproximação da geometria original. (AZEVEDO, 2014).

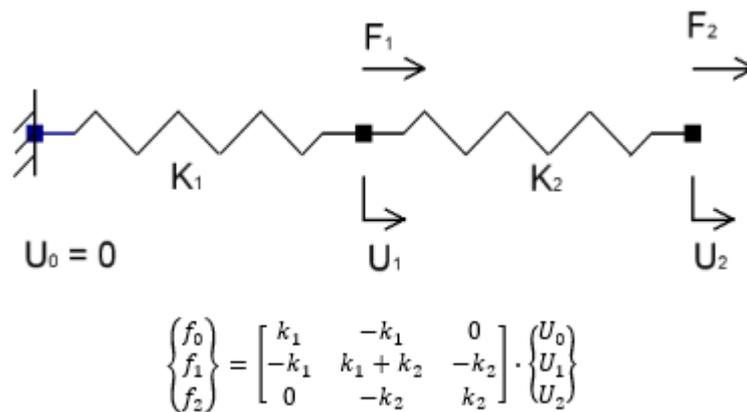
Figura 9 - Similaridade entre um objeto e uma mola carregados axialmente.



Fonte: Azevedo, (2014).

O conjunto desses elementos ligados através dos nós em comum, formam a matriz global composta por vetores e matrizes de rigidez utilizada posteriormente o cálculo dos deslocamentos, tensões e deformações do componente. A Figura 10 apresenta uma representação do modelo linear de barra sob tração e a equação matricial do sistema de dois elementos em série.

Figura 10 - Elemento linear de barra em série com rigidez, deslocamentos e forças diferentes.



Fonte: Adaptado de Azevedo, (2014).

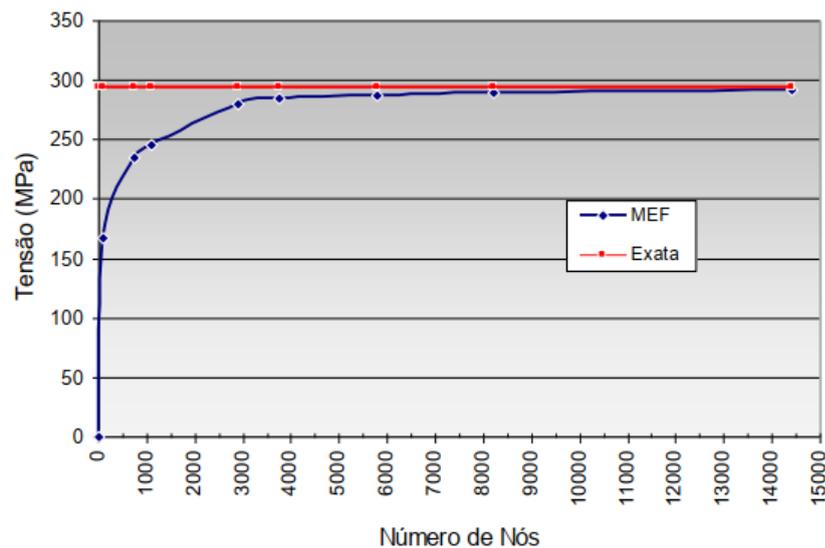
2.4.1 Malha

Segundo Narasaiah, (2021), o processo de geração de malha é uma das tarefas mais difíceis na análise estrutural utilizando o método de elementos finitos, entretanto em diversos softwares comerciais isso é feito de forma automática, permitindo que o engenheiro projetista faça modificações necessárias.

A geração da malha é uma das etapas mais importantes no processo de análise, pois a quantidade e qualidade de elementos está diretamente relacionado com o tempo, simulação, estabilidade e precisão dos resultados. Quanto maior o número e a qualidade dos elementos maior será o tempo necessário para obtenção dos resultados, entretanto os resultados serão mais próximos do real. Porém, se a malha não possui uma quantidade de elementos necessários para uma boa representação da geometria e o nível de qualidade não for satisfatório pode levar a erros grosseiros, com resultados imprecisos (FISH e BELYTSCHKO, 2007).

O estudo de convergência de malha é uma técnica comumente usada para a avaliação da precisão dos resultados obtidos com base no número de elementos. Essa técnica consiste em variar o tamanho e a quantidade de elementos, geralmente reduzindo seu tamanho em regiões críticas da geometria e avaliando as mudanças na solução numérica obtida. A cada iteração, o número de elementos nas regiões de concentração de tensão aumenta, permitindo uma melhor captação dos efeitos locais e, conseqüentemente, maior precisão nos resultados. A malha é chamada de convergente quando o erro da solução numérica atinge um valor previamente estabelecido (FILHO, 2018). A Figura 11 apresenta um exemplo de estudo de convergência de malha.

Figura 11 - Gráfico de Convergência da tensão em função do número de nós.



Fonte: Azevedo, (2014).

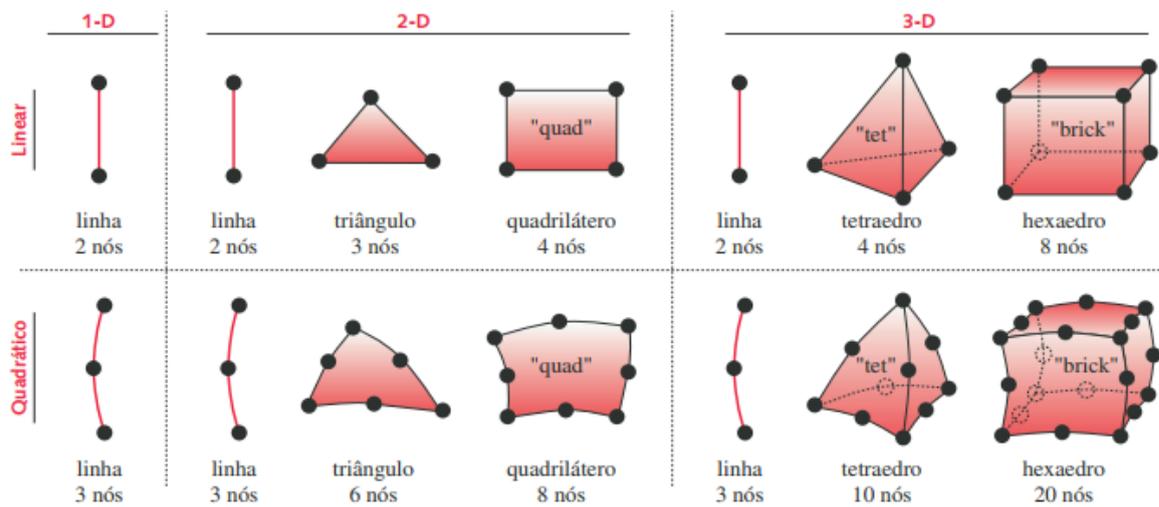
2.4.2 Tipos De Elementos

Elemento é a menor parte da subdivisão da geometria que compõem a malha e os nós fazem a união entre os elementos. Os elementos são classificados conforme o número de dimensões que possuem, podendo ser unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. Além disso, podem possuir diferentes ordens, sendo as ordens o grau do polinômio utilizado para interpolar o deslocamento no interior do elemento (NORTON, 2013).

Segundo Norton (2013), os graus de liberdade de cada nó de um elemento são definidos com base na dimensão do elemento. Dessa forma, elementos

unidimensionais são elementos estruturais adequados para modelagem de membros de treliças e vigas com área de seção transversal constante, podendo transmitir força ao longo do seu comprimento sem suportar momento nos nós. Elementos bidimensionais podem utilizados para modelagem de estruturas tridimensionais cujas tensões e deformações são planas. Os elementos de 1-D e 2-D são meios de simplificar a geometria a fim de reduzir o custo de processamento, entretanto, diversos componentes têm a geometria e o carregamento de tal forma que requerem o uso de elementos 3-D. A Figura 12 apresenta alguns elementos comuns utilizados nos modelos de elemento finito.

Figura 12 - Tipos e ordens dos elementos.



Fonte: Norton, (2013).

A ordem de um elemento é o grau da função utilizada para descrever os deslocamentos no interior de um elemento. Elementos de maior ordem são utilizados em contornos curvos de maior complexidade, devido a sua capacidade de melhor representação da geometria (AZEVEDO, 2014).

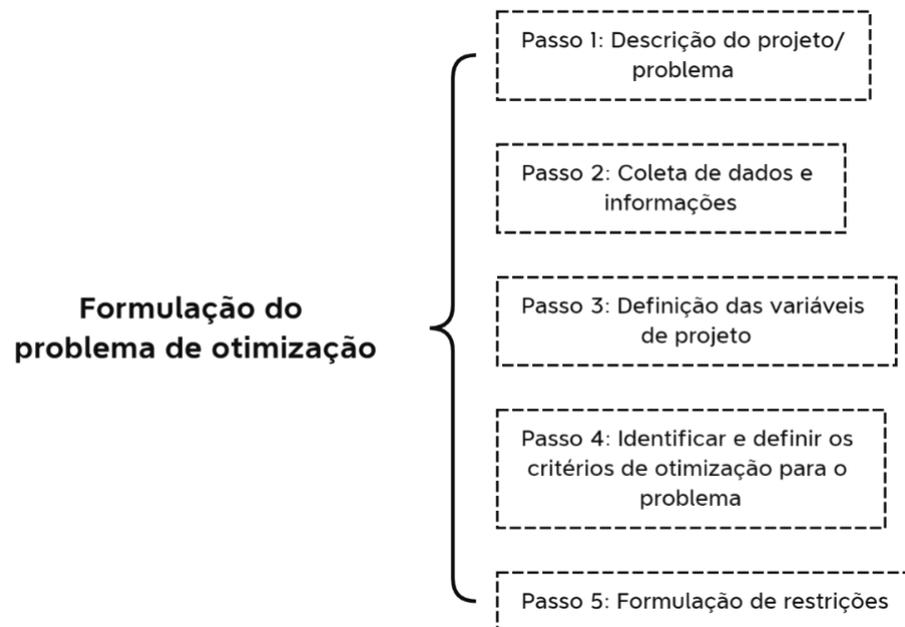
2.5 OTIMIZAÇÃO

Segundo Arora (2004), técnicas de otimização tem uma ampla aplicabilidade em diversos campos, no que se refere a projetar e fabricar sistemas complexos como prédios, pontes, rodovias, automóveis, componentes estruturais entre outros, há um investimento substancial a fim de se obter um bom projeto. Entretanto, uma vez que

qualquer problema que necessite de uma combinação de parâmetros específicos para satisfazer as restrições impostas pode ser modelado como um problema de otimização. Dessa forma, é possível obter configurações otimizadas reduzindo recursos humanos, materiais e financeiros.

Os métodos de otimização são processos iterativos, cuja formulação do problema consiste em uma declaração matemática. Arora (2004) afirma que 50% do esforço necessário para a solução de um problema de otimização está na formulação e definição adequada dos parâmetros e restrições críticas consistentes, uma vez que a não inclusão de uma restrição crítica na formulação a solução ótima o violará. Além disso, caso as restrições não sejam consistentes, não haverá solução ótima para o problema. A fim de reduzir problemas apresentados, Arora (2004) estabelece 5 passos apresentados na Figura 13 para a correta formulação de um problema de otimização.

Figura 13 - Passos para a formulação do problema de otimização.



Fonte: Autor, (2024).

Segundo Silva (2001), a formulação de um problema de otimização é definido pela função objetivo, variáveis de projeto e restrições. A função objetivo é a função que representa o valor a ser minimizado ou maximizado em um processo de otimização, como, por exemplo, a massa, frequência ou volume de um componente estrutural, o custo de um processo ou a trajetória de um veículo. O processo de

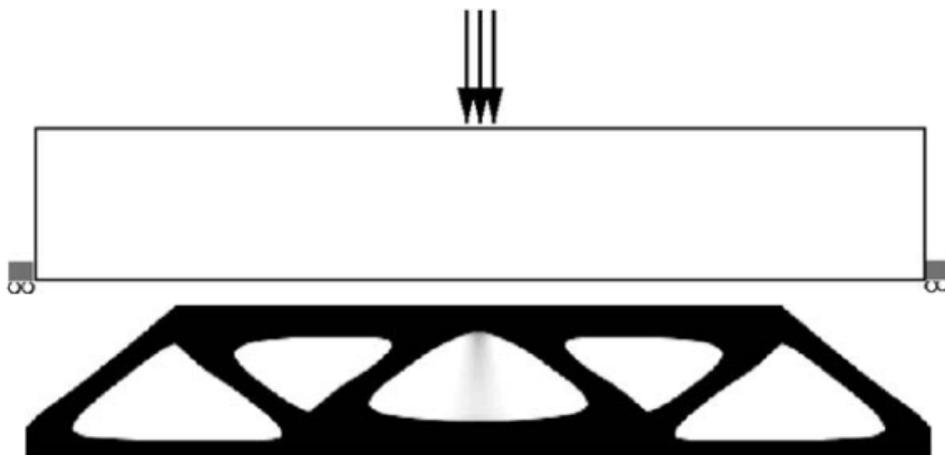
otimização da função objetivo consiste em encontrar os valores das variáveis de projeto como, por exemplo, a dimensão ou distribuição de material ao longo de um domínio que, combinadas, atendam ao critério estabelecido respeitando as restrições impostas ao projeto como, por exemplo, tensão máxima, deslocamentos, entre outras.

Os problemas de otimização podem ser divididos em diversos grupos com base nas variáveis de projeto, restrições e função objetivo. Dessa forma, as principais técnicas de otimização estrutural são: otimização topológica, otimização de forma, e otimização paramétrica.

2.5.1 Otimização Topológica

Segundo Bendsoe e Sigmund (2003), a técnica de otimização topológica é uma ferramenta poderosa de projeto que consiste em projetar estruturas eficientes através da distribuição mais eficiente de material na região de otimização. Nessa técnica, as únicas grandezas conhecidas no problema são as condições de contorno como carregamentos, suportes e restrições, o volume da estrutura e restrições adicionais de projeto. A Figura 14 apresenta um exemplo de otimização topológica cuja função objetivo é a redução da massa em 50% de forma que o material deve ser distribuído para o desempenho ideal sob as condições de contorno impostas.

Figura 14 - Exemplo de otimização topológica bidimensional.

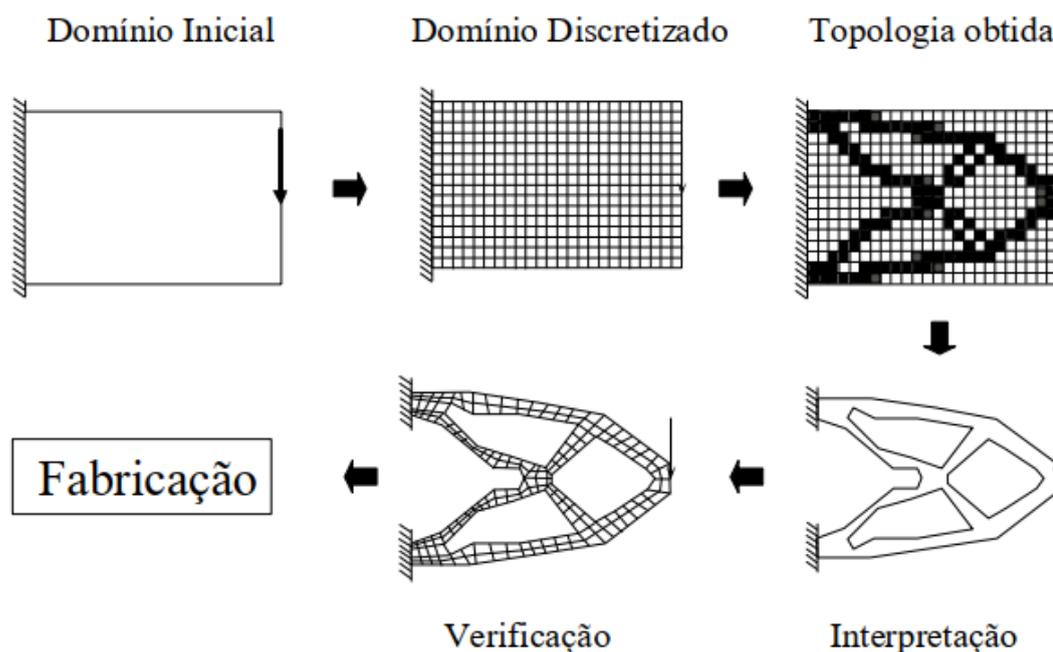


Fonte: Christensen e Klarbring, (2008).

A otimização topológica surgiu em 1988 nos EUA e Europa com a publicação de do artigo "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method" pelos autores Martin P. Bendsøe e Noboru Kikuchi. Na década de 90 foi bastante utilizada nas indústrias automobilísticas e aeronáutica dos EUA, Japão e Europa. Desde então, houveram diversas contribuições de outros pesquisadores desenvolvendo novas abordagens e a aplicações sendo uma técnica amplamente utilizada em projetos nas áreas de engenharia, arquitetura e design de produtos, tornando o processo mais genético, sistemático e otimizado, fornecendo uma geometria inicial otimizada (SILVA, 2001).

Silva (2001) divide o processo de otimização topológica em 6 etapas essenciais que auxiliam na compreensão e boa implementação da técnica. A Figura 15 apresenta as diferentes etapas do processo de otimização topológica.

Figura 15 - Procedimento típico de projeto estrutural por otimização topológica.



Fonte: Silva, (2001).

O primeiro passo é a definição do domínio de análise. Esse domínio é a região ou volume geometricamente disponível para a presença ou remoção de material limitado pelas condições de contorno e restrições. É importante evitar restrições desnecessárias, uma vez que quanto maior o número de restrições, menor é a melhoria obtida.

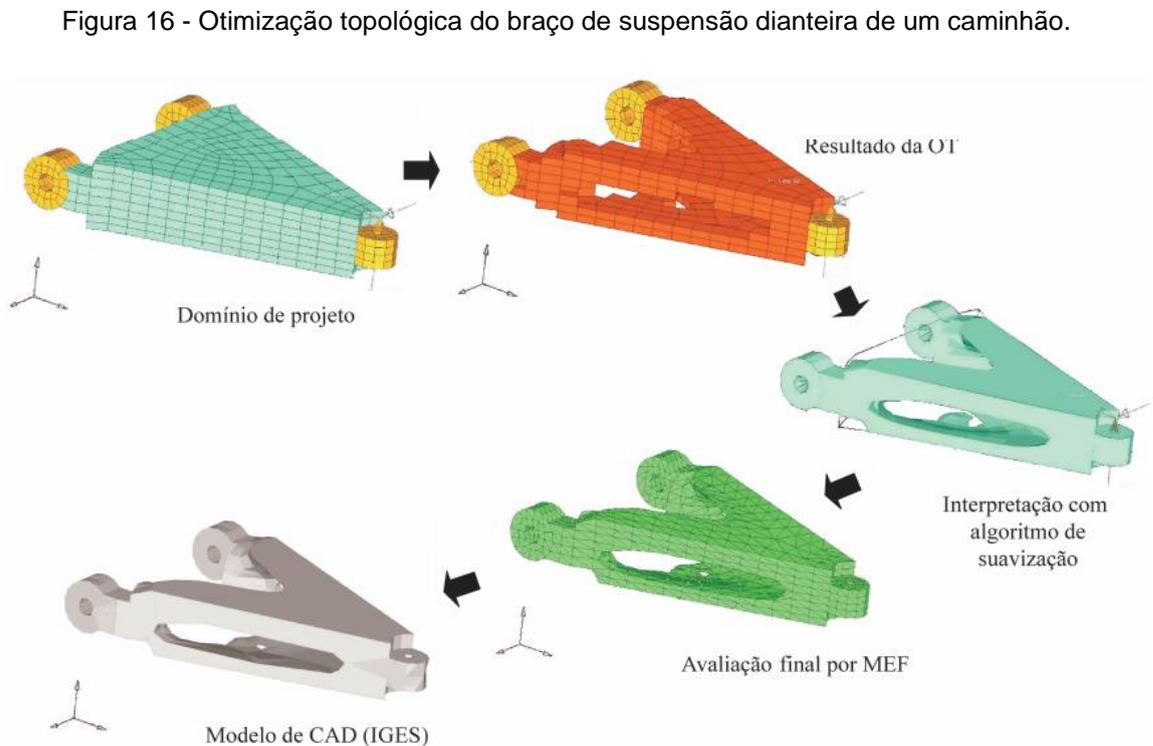
O segundo passo é a discretização do domínio, onde a geometria é subdividida em pequenos elementos finitos para o problema poder ser numericamente resolvido.

O terceiro passo consiste na otimização da geometria. Nesta etapa é utilizado o algoritmo de otimização para a otimização da função objetivo para minimizar a massa através da distribuição mais eficiente de material na malha, reduzindo seu peso e maximizando a rigidez.

O quarto passo consiste na verificação do resultado da geometria otimizada, onde o projetista efetua uma interpretação acerca dos resultados obtidos. Nessa etapa o projetista realiza um processamento de imagem (suavização da geometria) ou redesenha a estrutura baseada nos resultados obtidos.

O quinto passo consiste na verificação do resultado da estrutura através do método de elementos finitos, garantindo assim que a solução atende às restrições e objetivos de projeto e verificar se a estrutura é viável e segura.

Por fim, o sexto passo consiste na fabricação da estrutura, implementando-a no mundo real. A Figura 16 apresenta um exemplo de aplicação automobilista do processo de otimização topológica.



Fonte: Silva, (2001).

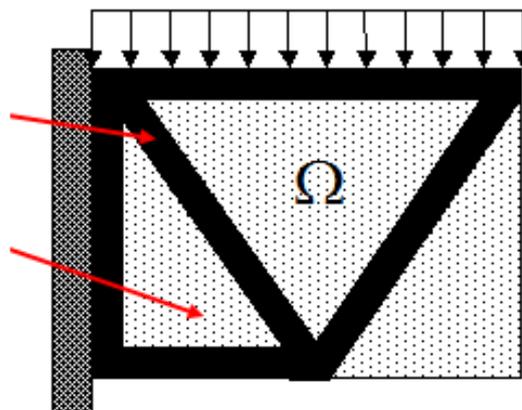
Segundo Silva (2001), a técnica de otimização topológica obteve grande aceitação na indústria devido ao fato de trabalhar em um domínio fixo no método de elementos finitos (MEF), uma vez que em um domínio tridimensional não acrescenta complexidade nem custo computacional no algoritmo.

2.5.1.1 SOLID ISOTROPIC MATERIAL WITH PENALIZATION (SIMP)

Para obtenção de uma geometria otimizada através da distribuição do material no domínio, a técnica de otimização topológica usa um conceito de que a rigidez da estrutura é diretamente proporcional à densidade do material em cada ponto da estrutura, essa abordagem é chamada de Solid Isotropic Material With Penalization (SIMP) (BENDSOE e SIGMUND, 2003).

Segundo Bendsøe (1989), a abordagem SIMP consiste em determinar em cada ponto no domínio se exista ou não material neste ponto. Esses pontos são definidos após a discretização do domínio onde cada elemento é preenchido ou esvaziado de material a depender da necessidade de material na região. O algoritmo de otimização altera as densidades do material na malha a fim de encontrar a melhor distribuição de material. Dessa forma, cada elemento recebe um valor que pode variar de 0 (vazio) a 1 (completamente sólido). Assim é possível o engenheiro obter uma geometria que apresente maior eficiência, menor custo com menos material satisfazendo as restrições de projeto impostas. A Figura 17 apresenta um layout de um material otimizado de uma viga carregada, onde os elementos sólidos são pretos e elementos vazios estão removidos.

Figura 17 - Viga carregada otimizada.



Fonte: SolidWorks Help, (2019).

Para evitar instabilidade estrutural e geometrias que dificultem sua fabricação, o método SIMP utiliza uma função de penalização para limitar a densidade do material em cada ponto da estrutura conforme a Equação 2.5.1.1 controlando a suavidade de transição entre as regiões de alta e baixa densidade.

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \quad (2.5.1.1)$$

Onde:

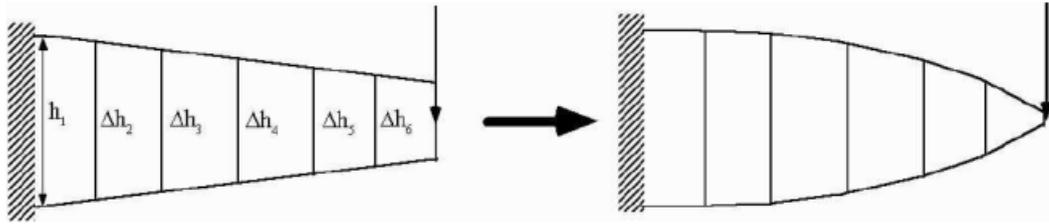
- E_0 é módulo de Young.
- p é o fator de penalização.
- ρ_e é a densidade relativa.

A partir disso, é calculada a rigidez global da estrutura visando a maximização do mesmo, removendo os elementos que possuem baixa densidade devido a pouca importância estrutural. A remoção desses elementos é realizada através da análise de sensibilidade considerando a conectividade entre os elementos através da verificação da influência dos elementos em um raio pre estabelecido, evitando que a geometria possua descontinuidades.

2.5.2 Otimização De Forma

A técnica de otimização de forma consiste em encontrar a melhor forma de um objeto ou estrutura com base em requisitos pre estabelecidos através da alteração da estrutura, obtendo assim uma geometria com o desempenho melhorado em termos de resistência ao estresse, vibração, fluxo de calor, etc. Nesse tipo de otimização as variáveis são os parâmetros que representam a forma do componente, como coordenadas de pontos nos contornos, coeficientes de uma curva, etc. (SILVA, 2001). A Figura 18 apresenta um exemplo de variáveis de projeto em uma otimização de forma.

Figura 18 - Exemplo de variáveis de projeto em otimização de forma.

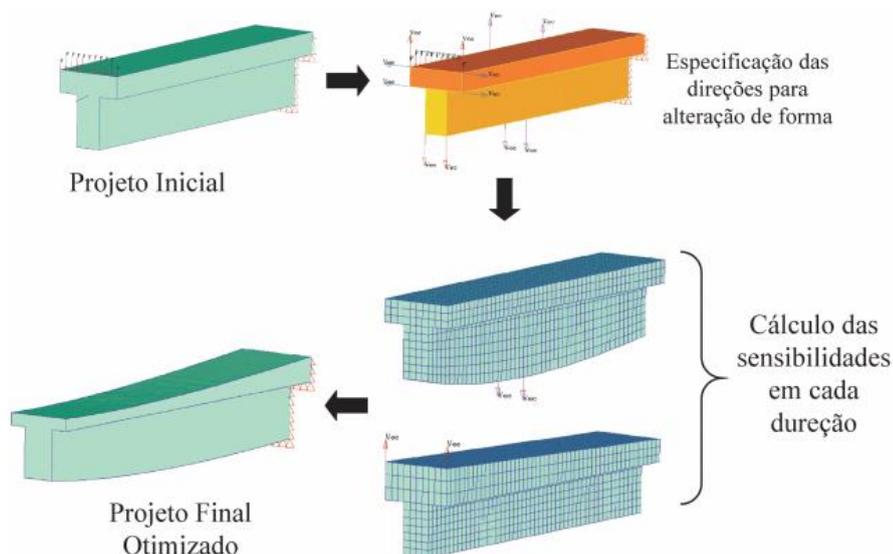


Fonte: Silva, (2001).

Coutinho (2006), afirma que esse tipo de otimização exige maior custo computacional e sofisticação para a implementação, uma vez que necessita que a malha gerada automaticamente seja muito sofisticada, uma vez que durante o processo de otimização a geometria sofre alterações, necessitando que seja realizado um remalhamento do domínio durante a otimização além de necessitar e derivadas muito precisas para a determinação da sensibilidade.

O processo de otimização de forma é um processo iterativo em que a geometria é modificada e remalhada diversas vezes ao longo da otimização. A Figura 19 apresenta um processo típico de otimização de forma onde o projeto inicial representa a geometria inicial com as condições de contorno (carregamento e fixação), é posteriormente realizado a especificação das direções para alteração de forma usada para análise de sensibilidade avaliando o quanto cada mudança influencia na melhora da função objetivo (SILVA, 2001).

Figura 19 - Processo típico de otimização de forma.

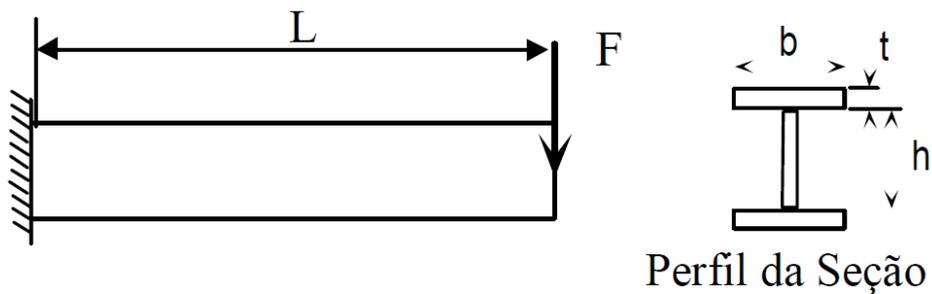


Fonte: Silva, (2001).

2.5.3 Otimização Paramétrica

A otimização paramétrica é uma técnica de otimização que consiste em ajustar os parâmetros de um modelo de modo a obter a combinação que resulte na minimização ou maximização da função objetivo, obtendo assim, melhor solução possível (SILVA, 2001). A Figura 20 apresenta um exemplo otimização paramétrica aplicada a uma viga em perfil “I” sujeita a um carregamento em uma extremidade e engaste na outra.

Figura 20 - Exemplo de Otimização Paramétrica.



Fonte: Silva, (2001).

Neste caso, as variáveis de projeto são os parâmetros que caracterizam a dimensão da estrutura (b , t e h). Nessa abordagem o software de otimização determina a combinação das variáveis de forma maximizar a rigidez da estrutura sem alterar a forma da geometria.

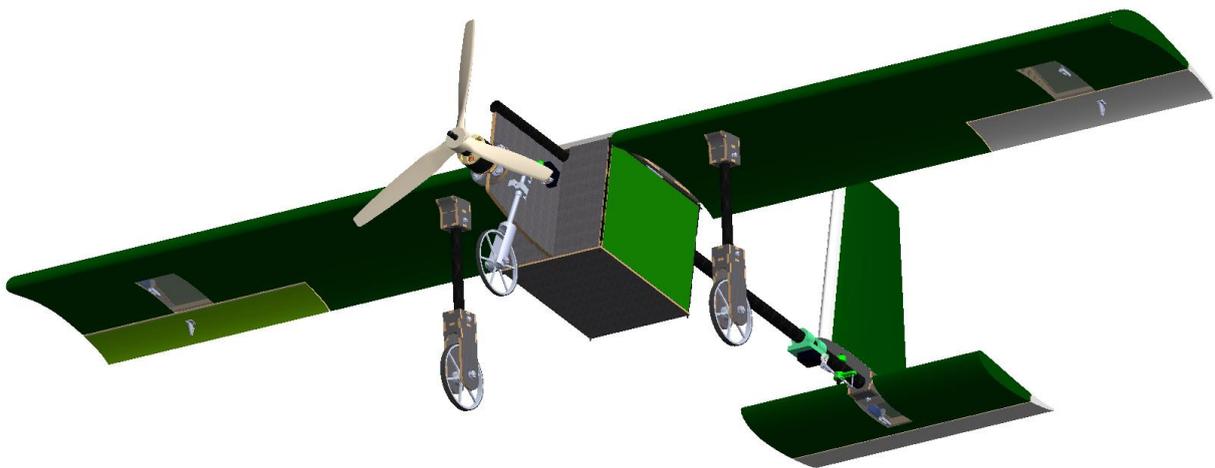
3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados as etapas e os respectivos métodos, para atingir os objetivos propostos neste trabalho. Esse trabalho trata-se de uma pesquisa classificada em relação à finalidade como pesquisa aplicada que consiste no desenvolvimento das rodas do conjunto de trem de pouso de um AeroDesign utilizando a técnica de otimização topológica, descritiva em relação aos objetivos com abordagem quantitativa. O método científico utilizado é o dedutivo.

3.1 AERONAVE

A aeronave em foco é um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), controlado remotamente por meio de rádio controle. Este é modelo do ano de 2022 da equipe Mandacaru AeroDesign da Universidade Federal de Pernambuco, foi empregado na Competição de *AeroDesign* SAE BRASIL 2022, conforme ilustrado na Figura 21. A aeronave deve ser capaz de transportar uma carga mínima equivalente ao seu próprio peso. Sua construção incorpora as principais estruturas encontradas em aeronaves comerciais.

Figura 21 - Aeronave da equipe Mandacaru AeroDesign de 2022.



Fonte: Neto et al. (2023).

O foco deste trabalho recai sobre as rodas do conjunto de trem de pouso principal e frontal em que o projeto inicial utilizado na competição de *AeroDesign* SAE

BRASIL 2022 pela Equipe Mandacaru Aerodesign, apresentado na Figura 22 foram fabricadas em alumínio 7075-T6, apresentando uma massa de 40,5 g cada. Apesar de idênticas, as rodas eram submetidas a carregamentos diferentes.

Figura 22 - Rodas da aeronave da Equipe Mandacaru AeroDesign utilizadas em 2022.

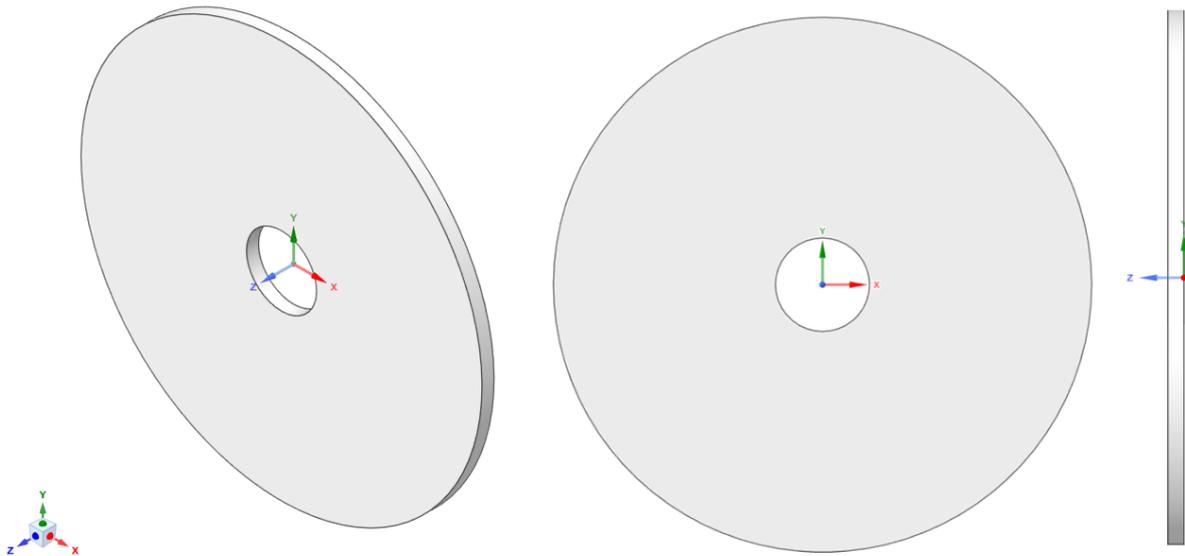


Fonte: Adaptado de Mandacaru AeroDesign, (2022a).

3.2 GEOMETRIA

A geometria para otimização foi gerada utilizando o *software Ansys SpaceClaim*. O modelo inicial, apresentado na Figura 23, é composto por um disco sólido de formato cilíndrico com 100 mm de diâmetro, contendo um furo central de 17.5 mm. Essa região é destinada ao acoplamento ao trem de pouso do aeromodelo. As espessuras iniciais das rodas do trem de pouso principal e do trem de pouso frontal foram estabelecidas com base nos resultados obtidos por Neto et al. (2022), sendo 6 mm e 4 mm, respectivamente.

Figura 23 - Geometria não otimizada.



Fonte: Autor, (2024).

3.3 MATERIAL

O material utilizado neste projeto foi a liga de alumínio 7075-T6, uma liga amplamente utilizada em projetos aeronáuticos que necessitam de alta resistência uma vez apresenta uma boa relação entre resistência e peso, proporcionando uma sólida resistência estrutural com um peso relativamente baixo. As propriedades mecânicas do material utilizado estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades da liga de alumínio 7075-T6.

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade	71,7 GPa
Módulo de Cisalhamento	27,5 GPa
Coefficiente de Poisson	0,306
Tensão de Escoamento	501 MPa
Tensão de Ruptura	561 GP1

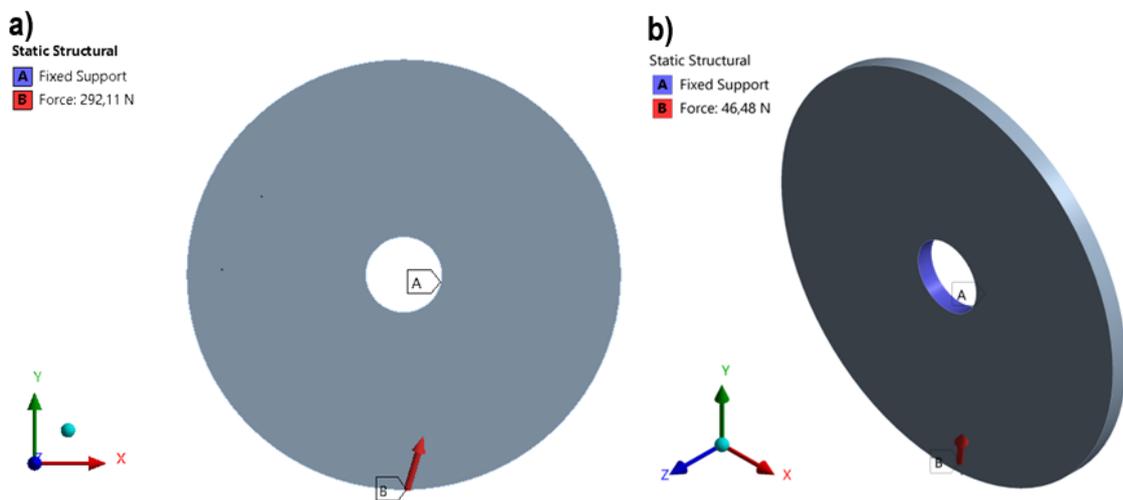
Fonte: Zhao & Jiang (2007).

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno para este problema envolvem a representação do pouso da aeronave considerando apenas uma roda, pois essa é a condição mais crítica do componente, uma vez que toda a carga é concentrada em apenas um elemento. Durante o pouso, ao entrar em contato com o solo, as rodas inicialmente não estão girando. Durante a breve fração de segundo necessária para iniciar o movimento de rotação, elas exercem uma significativa força para trás devido ao atrito com a pista. Isso resulta em cargas verticais, longitudinais e laterais, conforme descrito por Raymer (2012).

Na região central da geometria, foi aplicada a condição de contorno "Fixed Support", onde todos os graus de liberdade estão fixos, impedindo qualquer rotação ou translação. Essa condição é crucial para simular adequadamente o contato inicial do componente com o solo durante o pouso. A Figura 24 ilustra a aplicação das condições de contorno nas rodas do trem de pouso principal e trem de pouso frontal.

Figura 24 - Condições de contorno nas rodas (a) do trem de pouso principal e (b) trem de pouso frontal.



Fonte: Autor, (2024).

As cargas atuantes foram calculadas pela Equipe de Mandacru Aerodesign durante a competição SAE Brasil AeroDesign 2022 considerando um fator de impacto e coeficiente de segurança de 3,00 e 1,35 respectivamente. A Tabela 2 apresenta os valores.

Tabela 2 - Cargas no Trem de Pouso.

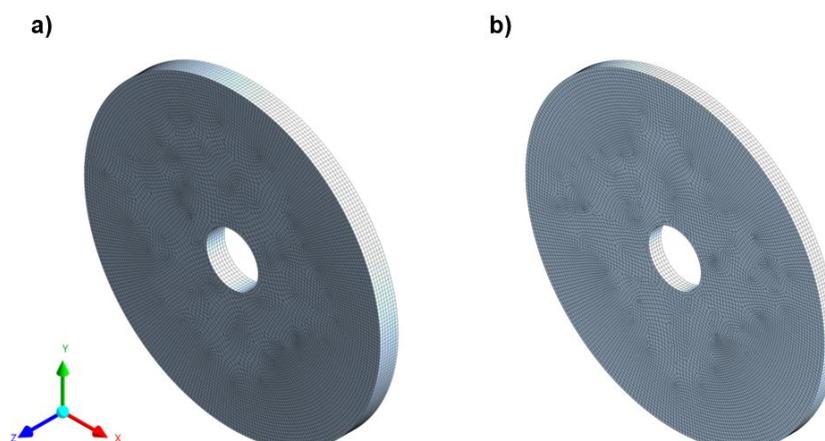
Cargas no Trem de Pouso Principal	
Força Horizontal	83,34 N
Força Vertical	277,83 N
Força Lateral	34,3 N
Força Resultante	292,11
Cargas no Trem de Pouso Frontal	
Força Horizontal	16,66 N
Força Vertical	41,67 N
Força Lateral	12,96 N
Força Resultante	46,48 N

Fonte: Mandacaru Aerodesign, (2022b).

3.5 MALHA

Inicialmente, utilizou-se uma malha genérica gerada pelo software, composta por elementos de 1 mm de dimensão, principalmente constituída por elementos hexaédricos. Esse tipo de elemento foi escolhido por proporcionar modelos mais precisos e prismáticos, dada sua maior flexibilidade na representação de curvas suaves. A Figura 25 apresenta a malha utilizada na análise das rodas.

Figura 25 - Malha em vista isométrica das rodas do (a) trem de pouso principal e (b) trem de pouso frontal.



Fonte: Autor, (2024).

Para avaliar a qualidade dessa malha, utilizou-se o *Element Quality* disponível no software *Ansys Mechanical* como métrica. O *Element Quality* fornece uma média de diversos parâmetros de qualidade da malha, tais como *Jacobian Ration*, *Warping Factor*, *Parallel Deviation*, *Maximum Corner Angle*, *Skewness* e *Orthogonal Quality*. Seu valor varia de 0 a 1, sendo 0 indicativo de inaceitabilidade e 1 representando excelente qualidade dos elementos. Para este parâmetro, foi obtida uma média de 0,999, com um desvio padrão de 0,004. Esses resultados indicam que a malha gerada apresenta uma qualidade elevada, com uma distribuição uniforme dos elementos e confiabilidade nos resultados obtidos na simulação.

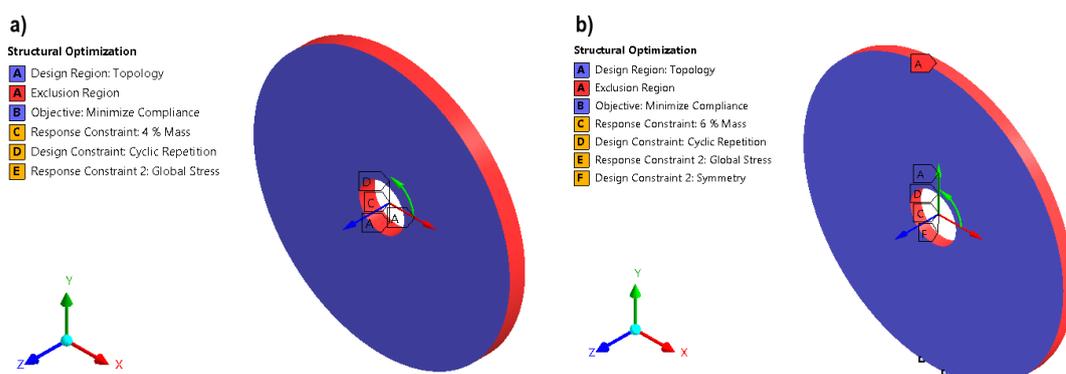
3.6 ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA

Após a geração da malha adequada, aplicação das condições de contorno e a aplicação das propriedades mecânicas do material utilizado no projeto, procedeu-se o processamento da análise estrutural estática afim de compreender o comportamento dos componentes em sua condição de uso, possibilitando analisar os pontos críticos das peças a partir da distribuição de tensões obtida. Essa informação é fundamental para o subsequente processo de otimização topológica.

3.7 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A partir dos resultados obtidos da análise estrutural estática das geometrias analisadas, é possível iniciar o processo de otimização topológica dos componentes. Figura 26 apresenta os objetivos e restrições de otimização dos componentes.

Figura 26 - Restrições de otimização topológica das rodas do (a) trem de pouso principal e (b) frontal.



Fonte: Autor, (2024).

Nesta etapa, foram definidos a função objetivo, seus parâmetros e as restrições necessárias para o processo de otimização. A tabela 3 apresenta uma visão geral dessas restrições, detalhando seus objetivos e aplicações nas rodas do trem de pouso principal e do trem de pouso frontal.

Tabela 3 – Função objetivo, seus parâmetros e restrições.

Restrição	Descrição	Aplicação
A	Define a região da geometria a ser otimizada. "Design Region" é a parte a ser otimizada, enquanto "Exclusion Region" é a parte onde o material deve ser mantido.	Ambas as rodas
B	Define o objetivo da otimização: "Minimize Compliance", ou seja, tornar o componente mais leve sem perder resistência.	Ambas as rodas
C	Define o percentual de massa a ser mantido na estrutura: 4% nas rodas do trem de pouso principal e 6% nas rodas do trem de pouso frontal.	Ambas as rodas
D	Garante que o componente seja simétrico, dividido em seis partes iguais.	Ambas as rodas
E	Limita a tensão máxima da geometria a 501 MPa, com base na tensão de escoamento do material e no coeficiente de segurança aplicado.	Ambas as rodas
F	Específica para a roda do trem de pouso frontal: estabelece um plano de simetria perpendicular ao eixo Z para garantir estabilidade e simetria, independentemente de como a força lateral é aplicada.	Roda do trem de pouso frontal

Fonte: Autor, (2024).

3.8 VALIDAÇÃO DO PROJETO OTIMIZADO

O resultado da otimização topológica é a distribuição de densidade dos elementos para a posterior suavização da geometria, gerando assim, uma geometria otimizada. Essa geometria otimizada é, então, submetida à análise estrutural, utilizando as mesmas condições do projeto, como propriedades do material e

condições de contorno. Devido à complexidade da nova geometria otimizada, foi conduzido um estudo de convergência de malha, refinando-a nas regiões de concentração de tensão. Esse refinamento visa reduzir os erros numéricos da simulação. Assim, garantimos um resultado que independe da malha, convergindo para um valor específico e assegurando uma representação precisa do comportamento estrutural otimizado.

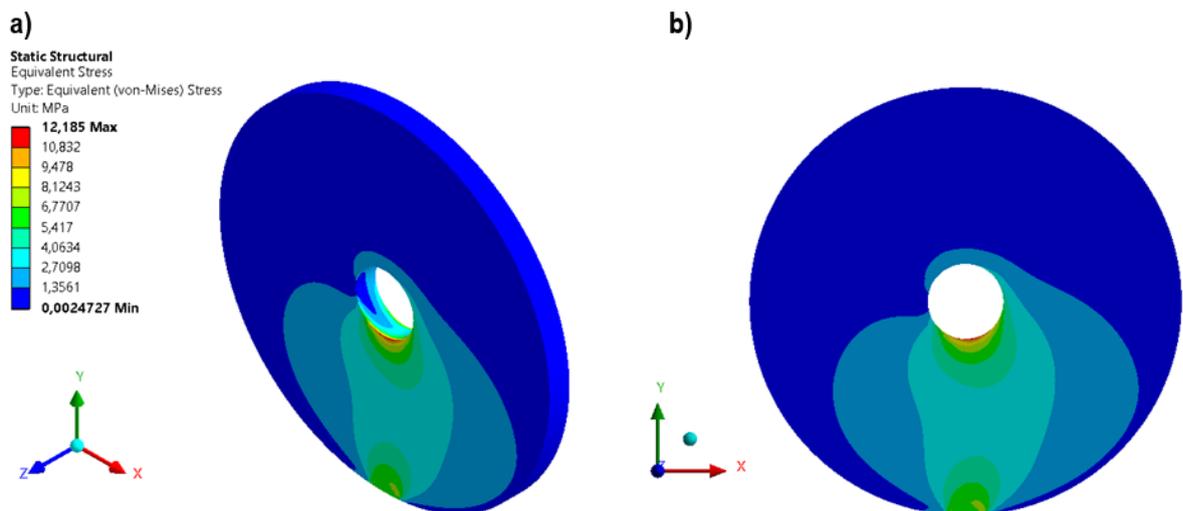
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos durante a execução das etapas descritas no Capítulo 3.

4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA

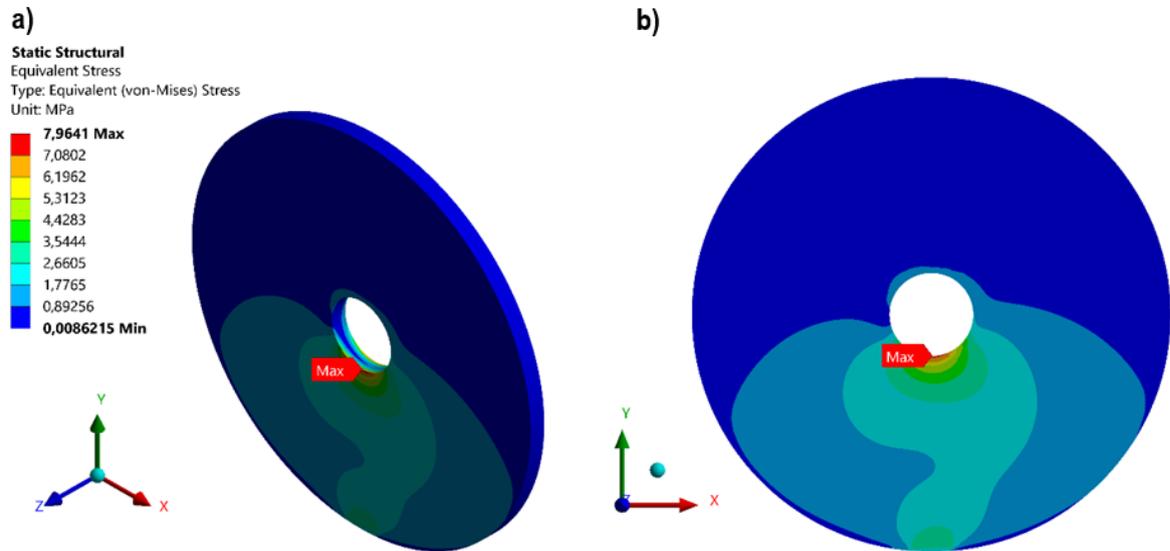
Como mencionado anteriormente, a análise estrutural estática precede a etapa de otimização topológica, proporcionando a distribuição de tensões na geometria dos componentes. Essa análise permite compreender o comportamento e identificar regiões críticas nas rodas analisadas. A Figura 27 e Figura 28 apresentam os resultados da distribuição de tensão de von Mises nas rodas do trem de pouso principal e do trem de pouso frontal, respectivamente. É importante destacar que os valores máximos observados, 15,19 MPa nas rodas do trem de pouso principal e 7,96 MPa na roda do trem de pouso frontal, encontram-se abaixo do limite de escoamento do material. Essa condição viabilizando a progressão para a etapa subsequente de otimização topológica do projeto.

Figura 27 - Tensões de von Mises nas rodas do trem de pouso principal (a) vista isométrica e (b) vista frontal.



Fonte: Autor, (2024).

Figura 28 - Tensões de von Misses na roda do trem de pouso frontal (a) vista isométrica e (b) vista frontal.

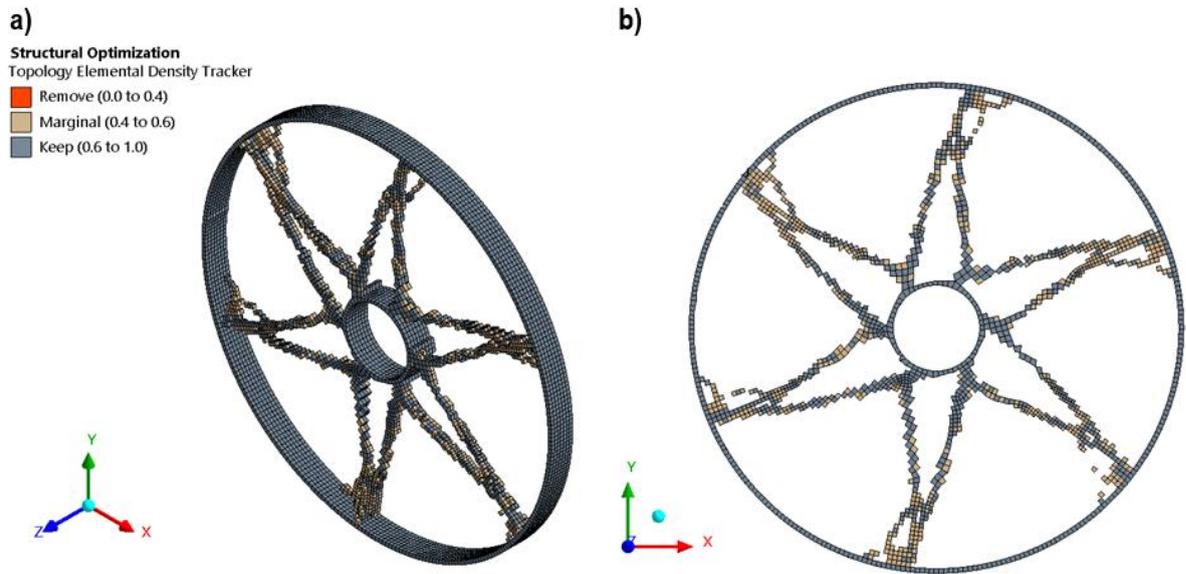


Este resultado favorável indica que a estrutura das rodas do trem de pouso possui uma margem de segurança em relação às tensões atuantes, permitindo a busca por configurações otimizadas.

4.2 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

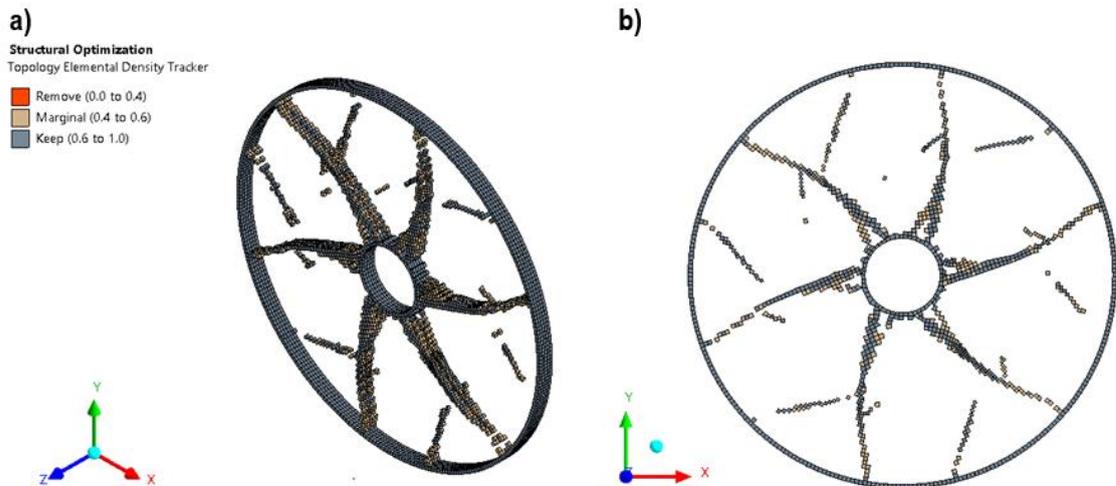
A partir da distribuição de tensão obtido na análise estrutural estática e restrições de otimizadas estabelecidas é possível obter a distribuição de densidades dos elementos, representando assim a distribuição de massa na estrutura otimizada das rodas do trem de pouso principal e da roda do trem de pouso frontal, conforme apresentadas na Figura 29 e Figura 30, respectivamente.

Figura 29 - Vista (a) isométrica e vista (b) frontal trem de pouso principal.



Fonte: Autor, (2024).

Figura 30 - Vista (a) isométrica e vista (b) frontal trem de pouso frontal.



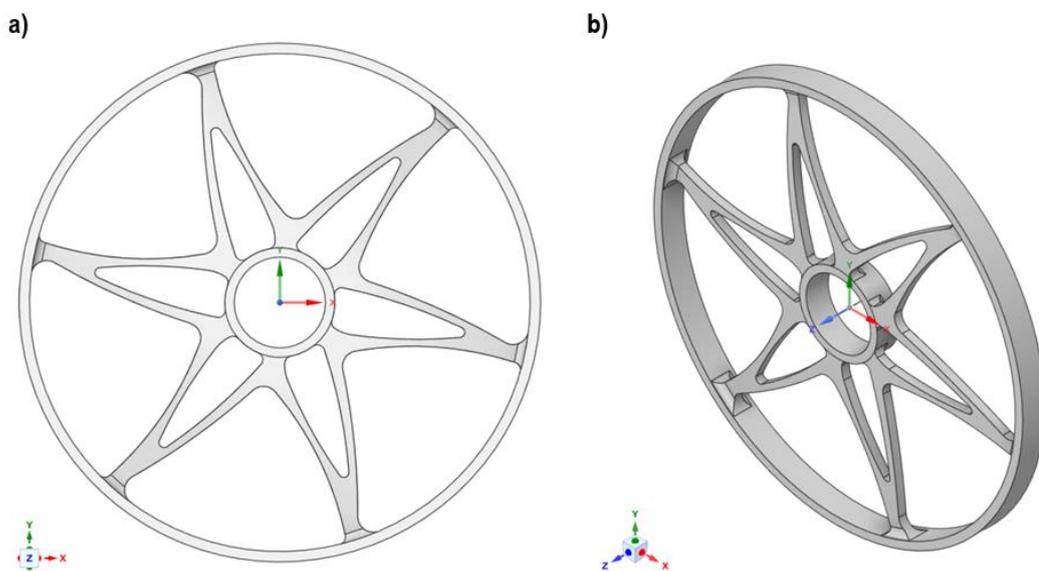
Fonte: Autor, (2024).

A distribuição de elementos das rodas apresenta uma configuração com raios curvados, que surge devido aos efeitos das forças longitudinais atuantes sobre elas. Esse tipo de geometria proporciona benefícios estruturais. A curvatura dos raios contribui para uma maior resistência mecânica, devido ao aumento da rigidez à torção unidirecional. Isso ocorre porque a forma curva permite uma distribuição mais eficiente das tensões, reduzindo a concentração de tensão e, conseqüentemente, o risco de falhas locais.

4.3 SUAUIZAÇÃO DA GEOMETRIA OTIMIZADA

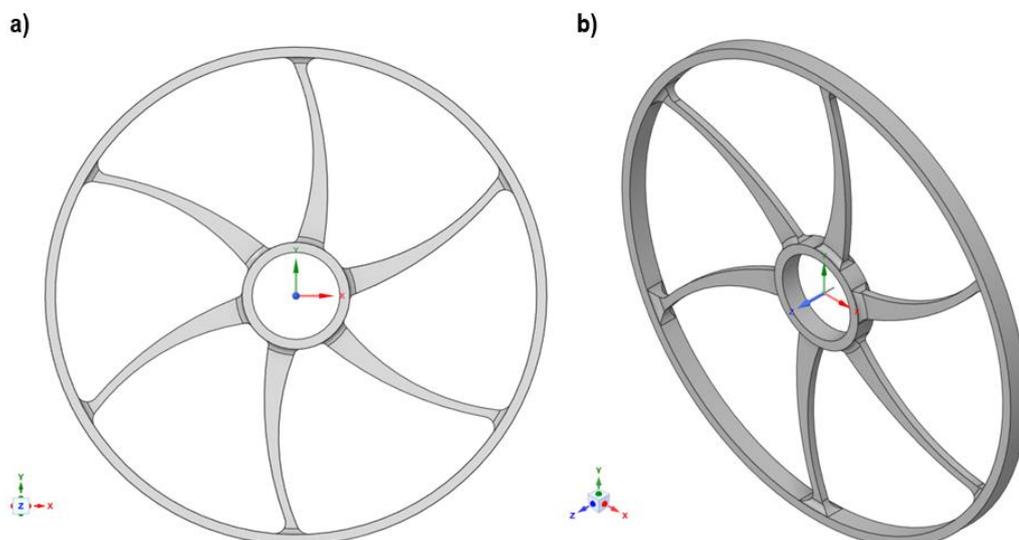
Após a obtenção da densidade de elementos, a geometria é, então, suavizada para posterior validação estrutural. Para isso, foi utilizado o *software SpaceClaim* para remodelar os componentes. A Figura 31 e Figura 32 apresentam as geometrias otimizadas das rodas do trem de pouso principal e do trem de pouso frontal, respectivamente.

Figura 31 - Vista (a) isométrica e vista (b) frontal da roda otimizada do trem de pouso principal.



Fonte: Autor, (2024).

Figura 32 - Vista (a) isométrica e vista (b) frontal da roda otimizada do trem de pouso frontal.



Fonte: Autor, (2024).

As rodas otimizadas do trem de pouso principal e frontal apresentam uma notável redução de peso em relação ao projeto original. A roda do trem de pouso principal, agora pesando 17,12 g, representa uma diminuição de 57,80% em relação ao projeto inicial usado pela equipe Mandacaru Aerodesign no ano de 2022, enquanto a roda frontal, com 10,82 g, resultando na redução de 73,26.

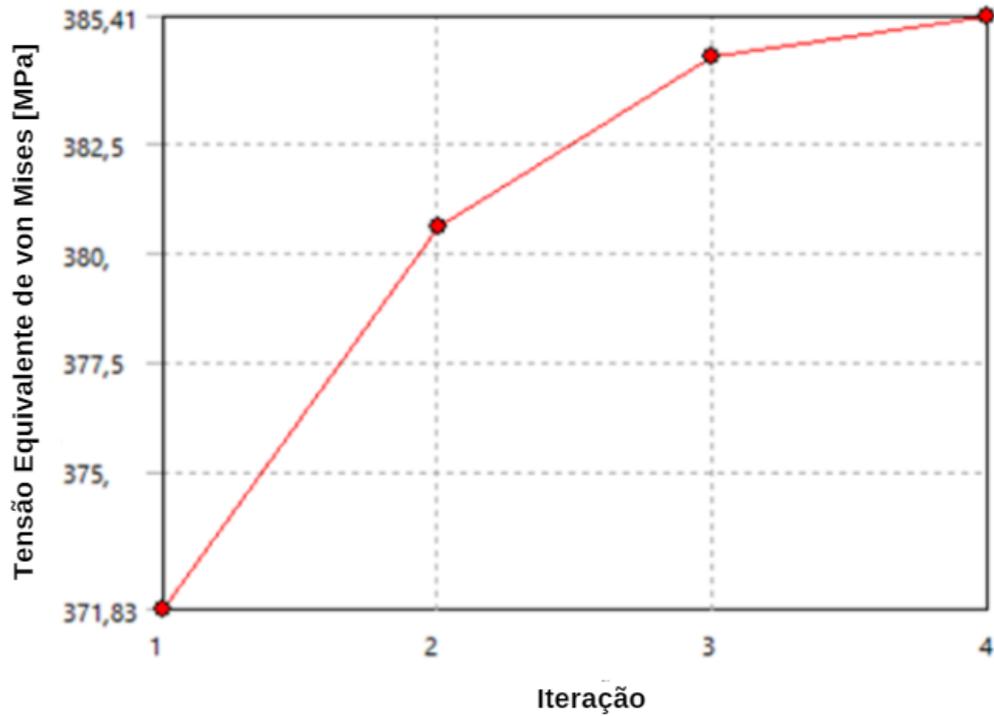
4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA DAS GEOMETRIAS OTIMIZADAS

Para assegurar que a geometria otimizada atendesse às condições de uso, foi conduzida uma análise estrutural estática para obter os novos valores de tensão. No entanto, devido à complexidade das novas geometrias, foram realizados estudos de convergência de malha nos quais a cada iteração aumentou-se o número de elementos na região de concentração de tensão, melhorando a captação dos efeitos locais e garantindo maior precisão nas áreas críticas.

Para isso, foi avaliada a tensão equivalente de von Mises, amplamente utilizada na análise de materiais dúcteis, como a liga de alumínio 7075-T6 empregada neste trabalho, devido à sua capacidade de prever falhas em condições de carregamento complexo.

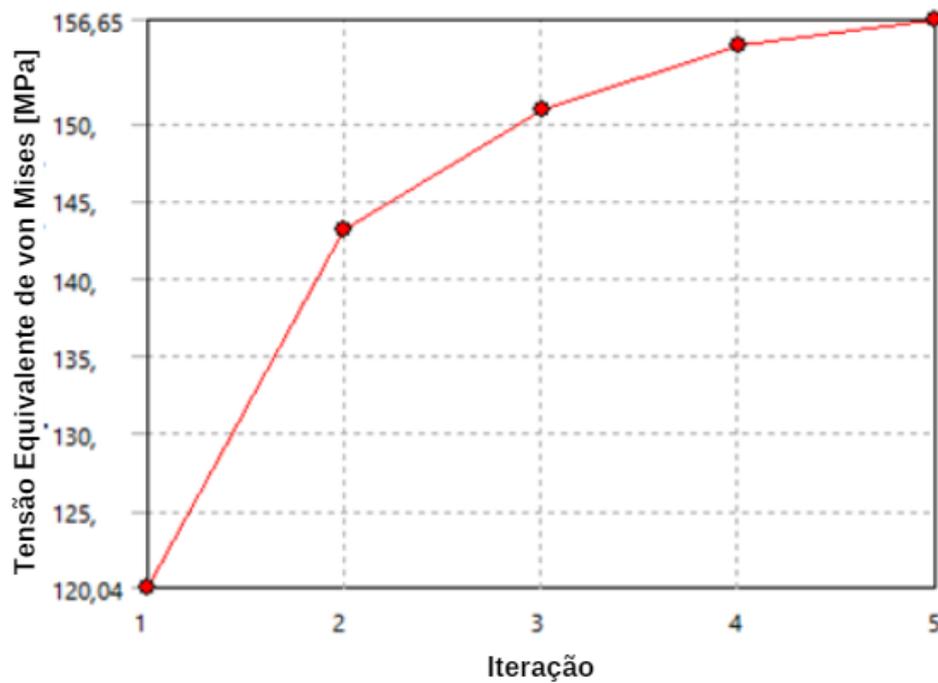
Esse estudo resultou em malhas cujos valores máximos de tensão não variaram mais que 2% após o refinamento subsequente da malha, indicando que a malha final está suficientemente refinada, assegurando resultados confiáveis na análise estrutural. Os resultados desses estudos para as rodas do trem de pouso principal e frontal estão apresentados na Figura 33 e Figura 34, respectivamente.

Figura 33 - Estudo de convergência de malha na roda do trem de pouso principal.



Fonte: Autor, (2024).

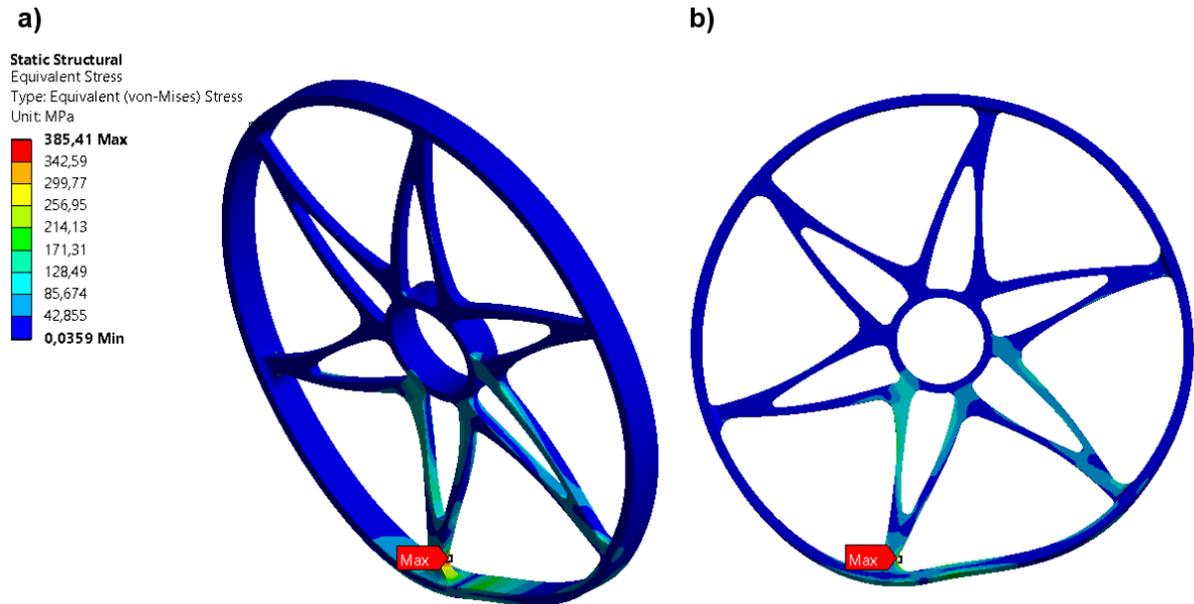
Figura 34 - Estudo de convergência de malha na roda do trem de pouso frontal.



Fonte: Autor, (2024).

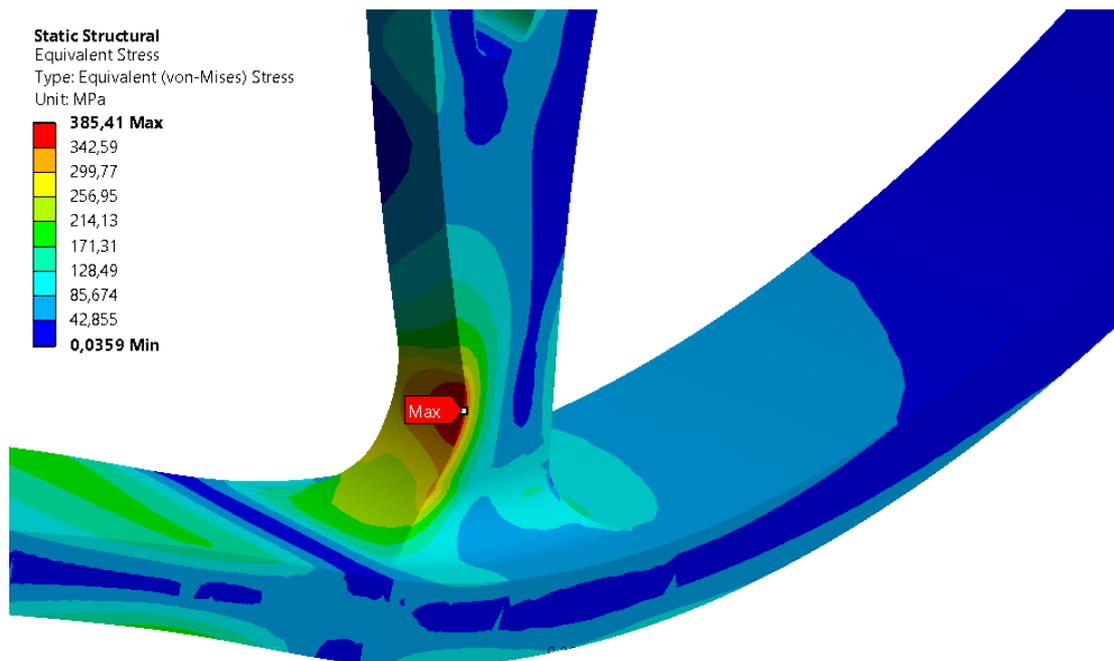
A Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38 apresentam os resultados da análise estrutural estática das rodas otimizadas do trem de pouso principal e frontal.

Figura 35 - Tensões de von Mises nas rodas otimizadas do trem de pouso principal (a) vista isométrica e (b) vista frontal.



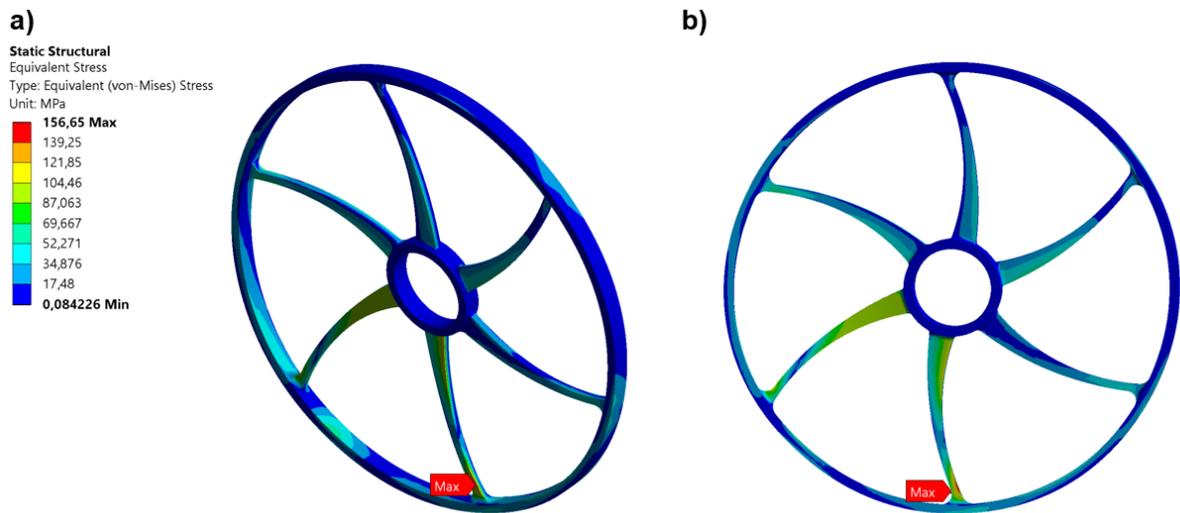
Fonte: Autor, (2024).

Figura 36 - Região de concentração de tensão de von Mises na roda otimizada do trem de pouso principal.



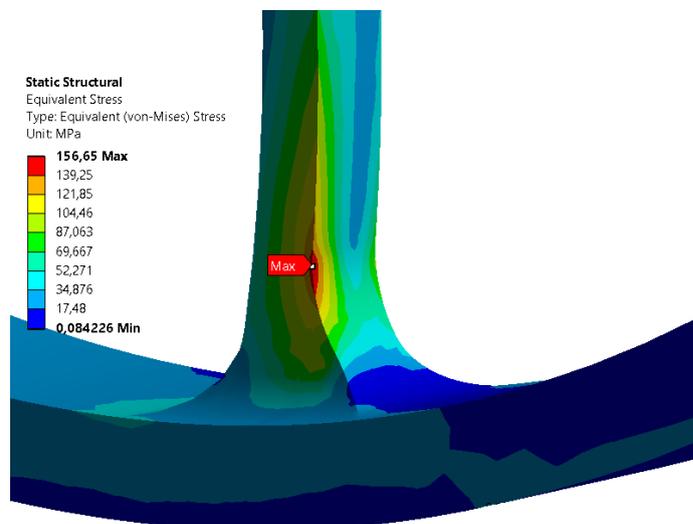
Fonte: Autor, (2024).

Figura 37 - Tensões de von Mises na roda do trem de pouso frontal (a) vista isométrica e (b) vista frontal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 38 - Região de concentração de tensão de von Mises na roda otimizada do trem de pouso frontal.



Fonte: Autor, (2024).

As rodas do trem de pouso principal e frontal apresentaram tensões de 385,41 MPa e 156,65 MPa, com coeficientes de segurança de 1,30 e 3,20, respectivamente. Esses valores estão abaixo da tensão de escoamento do material, garantindo que as rodas otimizadas possuam a resistência necessária para enfrentar condições críticas, como o pouso em apenas uma roda.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho concentrou-se no desenvolvimento das rodas do conjunto de trem de pouso de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), utilizando a técnica de otimização topológica. O objetivo principal foi desenvolver rodas mais leves em comparação com as utilizadas pela Equipe Mandacaru AeroDesign na Competição SAE BRASIL 2022.

Além disso, foi apresentado como o conjunto trem de pouso de uma aeronave é um projeto crítico, uma vez que o mesmo é responsável por cerca de 55% das falhas ocorridas em aeronaves durante as fases de decolagem e pouso. Além disso, o correto dimensionamento dos seus componentes sem elevar o peso da aeronave é fundamental para a segurança e eficiência.

Através deste trabalho, as rodas otimizadas do trem de pouso principal alcançaram uma redução significativa de sua massa, resultando em 17,12 g, representando uma diminuição de 57,80% em relação ao projeto inicial. As rodas do trem de pouso frontal, sujeitas a menores amplitudes de carregamento, apresentaram uma redução ainda mais expressiva, atingindo 73,26% de diminuição de massa em relação ao projeto original. Essas melhorias significativas contribuíram substancialmente para o desempenho da aeronave, cumprindo os objetivos estabelecidos.

É importante ressaltar que as técnicas empregadas neste projeto não se limitam apenas a aeromodelos, podendo ser aplicadas em aeronaves comerciais e diversos outros componentes estruturais.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Sugere-se a combinação das técnicas de otimização topológica e paramétrica para alcançar dimensões ainda mais eficientes e precisas. Essa abordagem não apenas otimiza a distribuição de material, mas também refina parâmetros geométricos como espessuras, ângulos e proporções, resultando em um desempenho estrutural superior. Além disso, a exploração de novos materiais, como nylon com fibra de carbono e PLA Premium, pode abrir oportunidades para configurações geométricas inovadoras, maximizando a resistência e minimizando o peso das rodas.

Ademais, é importante investigar o uso da manufatura aditiva, que oferece

maior liberdade no design e permite a criação de geometrias complexas, ampliando as possibilidades de configuração para as rodas.

Por fim, recomenda-se realizar testes de resistência nas geometrias otimizadas para validar os resultados obtidos nos processos de otimização. Esses testes são essenciais para garantir que as melhorias previstas nas simulações atendam às condições reais de operação, assegurando a integridade estrutural e o desempenho das peças sob carregamentos críticos.

REFERÊNCIAS

- ABELING, Ariel. Dimensionamento de um conjunto trem de pouso para Aerodesign. 2016.
- ALBERTI, Felício Junior; ARAÚJO, Fernando R.; GENTILI, Rafael A. Análise linear de tensões em trem de pouso de uma aeronave da competição aerodesign da SAE Brasil. 2007. 63 p. Monografia. (Graduação) – Centro Universitário Positivo, Curitiba, 2007.
- AZEVEDO, D. F. D. O. Análise Estrutural com Ansys Workbench: Static Structural. [S.l.]: Mogi das Cruzes, 2014.
- BENDSØE, M. P., & KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, pp. 197-224. 1988.
- BENDSOE, M. P., & SIGMUND, O. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media, 2003.
- BIANCHINI, Denis. *Conhecimentos Técnicos-Piloto Privado e Comercial*. Editora Bianch, 2015.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. K. *Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica*. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- COUTINHO, K. D. Método de Otimização Topológica em Estruturas Tridimensionais. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. Natal, p. 109. 2006.
- DU, X. J.; ZHANG, S. R.; ZHANG, Y. H. Fatigue life prediction of the gear box in tracked vehicles based on running simulation tests. *Strength of Materials*, v. 51, n. 4, p. 578-586, 2019.
- FAA Handbooks Manuals. Chapter 13: Aircraft Landing Gear Systems, Washington DC, 2012.
- FAA. *Airplane Flying Handbook: FAA-H-8083-3C*. Aviation Supplies & Academics, Incorporated, 2021.
- FAA. *Aviation Maintenance Technician Handbook – Airframe Volume 1*. Washington, U.S. Department of Transportation, 2012.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA)/AVIATION SUPPLIES & ACADEMICS (ASA). *Airplane Flying Handbook: FAA-H-8083-3C*. Aviation Supplies & Academics, Incorporated, 2021.
- FILHO, A. A. *Elementos Finitos a base da Tecnologia CAE*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2018.
- FISH, J.; BELYTSCHKO, T. *A First Course in Finite Elements*. New York: Wiley,

2007.

GOYAL, Amit. Light Aircraft Main Landing Gear Design and Development. MS Ramaiah, School of Advanced Studies, INDIA, 2002.

HOLZMANN, Henrique Ajuz; DALLAMUTA, João Luiz. Engenharia Mecânica: A influência de máquinas, ferramentas e motores no cotidiano do homem. 2021.

MICHAELIS. Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa Online. São Paulo: Editora Melhoramentos, 2022. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/>. Acesso em: 02 jan. 2024.

Mandacaru Aerodesign. Cargas e Aeroelasticidade. Relatório Técnico nº 207. Recife, 2022b.

Mandacaru Aerodesign. Estruturas e Ensaio Estruturais. Relatório Técnico nº 207. Recife, 2022a.

NASA. An Overview of Landing Gear Dynamics. Hampton, Virginia. U.S. Army Research Laboratory, Vehicle Technology Directorate, Langley Research Center. 1999.

NARASIAH, G. L. Finite Element Analysis. [S.l.]: [s.n.], 2021.

NETO, Paulo Virginio da Silva et al. Dimensionamento de um trem de pouso da SAE Aerodesign auxiliado por simulação estrutural e análise de custos no processo de manufatura. In: 12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 10 a 12 de maio de 2023, Brasília, DF, Brasil.

RAYMER, Daniel. Aircraft design: a conceptual approach. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda José. Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com aplicações ao projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho. Luiz Eduardo Miranda José Rodrigues–Salto/SP: www.engbrasil.eng.br, 2014.

ROSKAM, Jan. Airplane Design: Part 5-Component Weight Estimation. DARcorporation, 1985.

SILVA, E. C. N. Técnicas de otimização aplicadas no projeto de peças mecânicas. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos Escola Politécnica da USP. [S.l.]. 2001.

SOLIDWORKS. Método SIMP para otimização de topologia, 2019. Disponível em: https://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm. Acesso em: 1 fev. 2022.

SOUZA, D. A. C.; RIBEIRO, S. L. M.; CARVALHO, A. L. C.; SILVA, N. S.; BARCELOS, S. M.; CHRISTOFORO, A. L. Topological optimization and genetic

algorithms used in a wheel project for a drone. International Journal of Statistics and Applications. 2013.

ZHAO, T.; YANYAO , J. Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy. International journal of fatigue, 2008.