

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

**LUIS FELIPI FERRAZ BATALHA
NICOLAS TRINDADE RUBIN**

**ANÁLISE DE FADIGA DO GARFO DO TREM DE POUSO DO
CESSNA 172S**

São José dos Campos
2024

**LUIS FELIPI FERRAZ BATALHA
NICOLAS TRINDADE RUBIN**

**ANÁLISE DE FADIGA DO GARFO DO TREM DE POUSO DO
CESSNA 172S**

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

Orientador: Me. Lucas Giovanetti

São José dos Campos
2024

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal
Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação

RUBIN, Nicolas Trindade

Análise de fadiga do garfo do trem de pouso do Cessna 172s. Nicolas Trindade Rubin, Luís Felipi Ferraz Batalha - São José dos Campos, 2024.

60f. (número total de folhas do TG)

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas. Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2024.

Orientador: Me. Lucas Giovanetti.

1. Trem de pouso. 2. Fadiga. 3. Otimização. I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II. Título

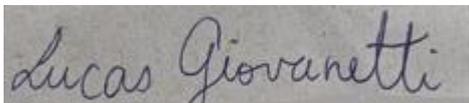
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BATALHA, Luis Felipi Ferraz; RUBIN, Nicolas Trindade. **Análise de fadiga do garfo dotrem de pouso do Cessna 172s**. 2024. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Projetos de Estruturas Aeronáuticas) – Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2024.

**LUIS FELIPI FERRAS BATALHA NICOLAS
TRINDADE RUBIN**

**ANÁLISE DE FADIGA DO GARFO DO TREM DE POUSO DO
CESSNA 172S**

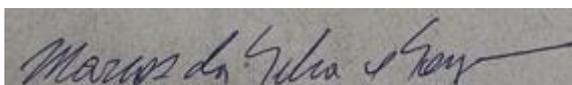
Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José
dos Campos, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção
do título de Tecnólogo em Projetos de
Estruturas Aeronáuticas.



Me. Lucas Giovanetti – FATEC SJC



Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi – FATEC SJC



Me. Marcos da Silva e Souza– FATEC SJC

09 / 12 / 2024

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

A equipe gostaria de agradecer primeiramente aos professores que aceitaram fazer parte deste trabalho, tanto ao professor orientador Lucas Giovanetti quanto aos professores Marcos da Silva de Souza e Renato Galvão Silveira Mussi, uma menção honrosa a professora Heide Heloise Bernardi por lecionar a matéria do trabalho em questão e auxiliar os alunos no desenvolvimento do trabalho de graduação, a equipe também agradece os colegas de classe, em especial a aluna Gabriele Christina Charameda Pereira por estar presente nos momentos bons e ruins dos membros da equipe e ajudá-los no desafio da graduação, por fim, agradecemos a todos os professores do curso de projetos de estruturas aeronáuticas pelas aulas ministradas e disseminação de conhecimentos valiosos não somente para a formação do aluno, mas também para a carreira profissional e vida cotidiana.

RESUMO

Este trabalho de graduação tem por objetivo principal a análise de fadiga, desde o conceito teórico até uma simulação prática. Utilizando-se do projeto do trem de pouso da aeronave Cessna 172 Skyhawk, mais precisamente do garfo do trem de pouso do nariz, essa análise foi realizada utilizando o software de simulação ANSYS e consiste no desenho 3D do conjunto de trem de pouso do nariz e na extração do garfo deste conjunto, após a extração, foram realizadas as etapas de adição do material da peça (liga de alumínio 7075-T6), criação da malha utilizando parâmetros de formato e espessura da peça e por fim a análise de fadiga com demonstrações de deformação total, tensão es equivalente, fator de vida e segurança. As principais literaturas utilizadas para este projeto foram o manual do Cessna 172 e o livro *Airplane Design Part IV: Layout of Landing Gear and Systems* do autor Dr. Jan Roskam.

O estudo apresentou a análise de fadiga do garfo do trem de pouso de nariz de um Cessna 172 Skyhawk, modelado em CAD e confeccionado com a liga de alumínio 7075-T6 devido à sua alta resistência e leveza. Após a extração do componente e adição do material no software ANSYS, foi criada uma malha de 3 mm para simulação. A análise incluiu as cargas limite e ultimate, representando as forças máximas aplicadas no componente durante o pouso. Os resultados demonstraram que o garfo atende aos requisitos normativos, com tensões dentro dos limites de escoamento e ruptura do material. Por fim, a análise de fadiga revelou que o componente possui "vida infinita", sendo capaz de suportar 90 mil ciclos sem falhas significativas, comprovando sua confiabilidade e superdimensionamento para a aplicação.

Palavras-Chave: Fadiga; ANSYS; trem de pouso.

ABSTRACT

The present work has as its main objective the analysis of fatigue, from the theoretical concept to a practical simulation. Using the design of the landing gear of the Cessna 172 Skyhawk aircraft, specifically the nose landing gear wheel yoke, this analysis was performed using the ANSYS simulation software. It consists of the 3D modeling of the nose landing gear assembly and the extraction of the fork from this assembly. After extraction, the following steps were carried out: adding the material of the part (7075-T6 aluminum alloy), creating the mesh using parameters for the shape and thickness of the part, and finally, performing the fatigue analysis, including demonstrations of total deformation, equivalent stress, life, and safety factor. The main literature sources used for this project were the Cessna 172 manual and the book *Airplane Design Part IV: Layout of Landing Gear and Systems* by Dr. Jan Roskam.

The study presented the fatigue analysis of the nose landing gear fork of a Cessna 172 Skyhawk, modeled in CAD and manufactured using 7075-T6 aluminum alloy due to its high strength and lightweight properties. After extracting the component and adding the material in the ANSYS software, a 3 mm mesh was created for simulation. The analysis included limit and ultimate loads, representing the maximum forces applied to the component during landing. The results showed that the fork meets regulatory requirements, with stresses within the material's yield and ultimate limits. Finally, the fatigue analysis revealed that the component has "infinite life," capable of withstanding 90,000 cycles without significant failures, proving its reliability and overengineering for the application.

Keywords: Fatigue; ANSYS; landing gear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aeronave Cessna 172S	14
Figura 2 - Envergadura e distância entre as rodas – vista frontal.....	16
Figura 3 - Comprimento e altura total - vista lateral	16
Figura 4 - Medidas principais da aeronave - vista superior.....	16
Figura 5 - Elementos básicos em um projeto de fadiga.....	17
Figura 6 - Tensão alternada entre uma tensão de tração máxima e uma tensão descompressão mínima.....	19
Figura 7 - Arranjos comuns de trens de pouso	25
Figura 8 - Amortecedor shimmy	26
Figura 9 - Conjunto de rodas	26
Figura 10 - Pneu utilizado no trem de pouso Cessna 172S	27
Figura 11 - Rodas da aeronave Cessna 172S.....	28
Figura 12 - Flanges independentes	28
Figura 13 - Meias-rodas.....	29
Figura 14 - Cubo-e-flange	29
Figura 15 - Freio a tambor.....	30
Figura 16 - Freio a disco.....	31
Figura 17 - Garfo	32
Figura 18 - Malha deformada representada sobre a estrutura indeformada	34
Figura 19 - Conjunto trem de pouso.....	41
Figura 20 - Garfo a ser extraído do conjunto.....	42
Figura 21 - Adição do material ao garfo.....	43
Figura 22 - Propriedades do material	44
Figura 23 - Gráfico tensão deformação do alumínio 7075-T6	44
Figura 24 - Confecção da malha.....	45
Figura 25 - Propriedade da malha	45
Figura 26 - Gráfico de distribuição de forças (Roskam)	46
Figura 27 - Adição da força calculada (carga limite)	47
Figura 28 - Gráfico de espectro de carga com uma missão.....	48
Figura 29 - Adição das força calculada (carga ultimate).....	49
Figura 30 - Deslocamento total	50

Figura 31 - Tensão equivalente	51
Figura 32 - Deformação elástica equivalente	51
Figura 33 - Deslocamento total	52
Figura 34 - Tensão equivalente	53
Figura 35 - Deformação elástica equivalente	53
Figura 36 - Vida útil do componente (vida infinita).....	54
Figura 37- Fator de segurança do componente.....	55
Figura 38 - Dano causado ao garfo do trem de pouso de nariz	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Informação técnica da Aeronave	15
Tabela 2 - Carregamento Dinâmico Máximo (Carga Limite)	46
Tabela 3 - Resolução do Carregamento Dinâmico Máximo de Carga Limite	47
Tabela 4 - Resolução da Fórmula de Carregamento Dinâmico e Aplicação da Carga Ultimate	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. <i>Objetivo Geral</i>	13
1.2. <i>Objetivos Específicos</i>	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. <i>História do Cessna 172s</i>	14
2.2. <i>Características da Aeronave</i>	15
2.3. <i>Fadiga</i>	17
2.4. <i>Fadiga e Otimização do Trem de Pouso de Aeronaves</i>	20
2.5. <i>O Trem de Pouso</i>	23
2.6. <i>Os Principais Componentes em um Trem de Pouso</i>	25
2.6.1 <i>Amortecedores SHIMMY</i>	25
2.6.2 <i>Conjunto de Rodas</i>	26
2.6.2.1 <i>Pneus</i>	27
2.6.2.2 <i>Rodas</i>	27
2.6.2.3 <i>Flanges Independentes</i>	28
2.6.2.4 <i>Meias-Rodas</i>	28
2.6.2.5 <i>Cubo-e-Flange</i>	29
2.6.3 <i>Freios</i>	30
2.6.4 <i>Garfo</i>	31
2.7. <i>Materiais do Trem de Pouso</i>	32
2.8. <i>Método de Elementos Finitos (MEF)</i>	33
2.9. <i>CAD</i>	34
2.10. <i>ANSYS</i>	35
2.11. <i>Aplicação do Ansys na Otimização do Trem de Pouso</i>	36
2.12. <i>Aplicação da Mecânica da Fratura no Trem de Pouso</i>	38
3. DESENVOLVIMENTO.....	41
3.1. <i>CARGA LIMITE</i>	46
3.2. <i>CARGA ULTIMATE</i>	49
4. DESENVOLVIMENTO.....	50
4.1. <i>CARGA LIMITE</i>	50
4.2. <i>CARGA ULTIMATE</i>	52
4.3. <i>ANÁLISE DE FÁDIGA</i>	54
5. CONCLUSÃO.....	56
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

A humanidade está em constante evolução, isto não se limita somente a ela, mas a toda a sua criação, portanto, todos os setores industriais estão em constante busca por melhorias, e, o setor aeronáutico não está fora disso.

Em termos de componente e estruturas aeronáuticas, em especial os trens de pouso, são componentes de suma importância para o funcionamento de uma aeronave, os trens de pouso têm como dois principais objetivos o taxiamento aéreo e o amortecimento da aeronave no pouso, suportando todas as cargas envolvidas neste fenômeno e proporcionando segurança e confiabilidade ao piloto, passageiros e tripulação (BIANCHI, 2023; TURNERBLOG, 2022).

Este estudo visa não apenas compreender a fadiga decorrente do uso exaustivo do trem de pouso, mas também aprimorá-lo para padrões ainda mais elevados de desempenho. O foco principal desta pesquisa repousa na análise estrutural do trem de pouso de nariz da aeronave Cessna 172S. Ao empregar ferramentas avançadas de simulação por meio de *software* especializado, este estudo visa identificar a durabilidade do trem de pouso, contribuindo assim para um voo mais seguro e eficiente no cenário aeronáutico contemporâneo (FERNANDES, METLER, 2021; ARAUJO, 2017).

A fadiga em estruturas é um fenômeno crítico na engenharia que pode levar à falha de componentes devido a ciclos repetidos de carga, ou seja, é a degradação de um material ou estrutura causada por ciclos repetitivos de carregamento. Diferente da falha por sobrecarga, que ocorre devido a uma carga única excessiva, a fadiga se desenvolve ao longo do tempo, resultando de ciclos repetidos de carga que podem ser menores do que a carga máxima que o material pode suportar de uma vez.

Alguns fatores que podem influenciar a fadiga em estruturas são:

- Amplitude da carga: A intensidade das cargas aplicadas durante o ciclo influencia diretamente o processo de fadiga.

- Frequência de Carga: A velocidade com que as cargas são aplicadas (frequência) também afeta o desenvolvimento da fadiga.

- Propriedades do Material: Materiais diferentes têm diferentes resistências à fadiga.

1.1. Objetivo Geral

Analisar o fenômeno de fadiga em trem de pouso, provocada por carregamento variável em trem de pouso para a aeronave Cessna 172S a fim de se obter a vida em fadiga e o dano acumulado durante os pousos e decolagens.

1.2. Objetivos Específicos

Analisar as propriedades mecânicas e aspectos de projeto das peças do trem de pouso do nariz da aeronave, para identificar as características do comportamento mecânico na estrutura para a aeronave Cessna 172S. Para obter-se o objetivo geral foram estabelecidos os objetivos específicos:

- Pesquisar as dimensões do trem de pouso do avião Cessna 172S;
- Elaborar um desenho em CAD;
- Importar o modelo em CAD para o *software* de elementos finitos;
- Gerar uma malha no modelo de elementos finitos;
- Calcular as cargas estática e de fadiga, e aplicá-las no modelo CAE;
- Rodar a análise estática;
- Analisar os resultados da análise estática;
- Definir o espectro de carregamento de fadiga;
- Rodar a análise de fadiga;
- Calcular o dano acumulado e a vida em fadiga do componente; e
- Analisar os resultados da simulação de fadiga.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados, a história do Cessna 172S, análise de fadiga, componentes do trem de pouso, *Software* CAD e o *software* Ansys.

2.1. História do Cessna 172s

Em junho de 1955, os céus testemunharam o nascimento do lendário Cessna 172, como mostrado na Figura 1, um ícone que transcendeu sua natureza de simples aeronave para se tornar uma lenda na aviação. Ao longo de 68 anos, o Cessna 172 viu sua evolução moldada pela demanda do mercado e pela busca incessante pela excelência. Esta é a fascinante história do avião mais produzido do mundo, uma narrativa que se desenrolou em versões, inovações e desafios, criando um legado que perdura até hoje (AUTOENTUSIASTAS, 2020).

Figura 1 - Aeronave Cessna 172S



Fonte: Cessna (2024)

No ano de 1955, o protótipo do Cessna 172 realizou seu primeiro voo, marcando o início de uma jornada incrível na aviação. Inicialmente concebido como uma versão aprimorada do modelo 170, o Cessna 172 rapidamente se destacou com seu *design* triciclo de trem de pouso, oferecendo controle direcional aprimorado e segurança operacional. O modelo 1956 foi lançado, estabelecendo um marco que ecoaria por décadas (AUTOENTUSIASTAS, 2020).

Ao longo dos anos, o Cessna 172 passou por transformações significativas. Atualmente, a aeronave representa o ápice da engenharia aeronáutica. Com avanços tecnológicos, instrumentação integrada no painel e melhorias constantes, o Skyhawk tornou-se uma aeronave completa, adequada até mesmo para voos por instrumentos. Apesar das mudanças no cenário da aviação, a Cessna permanece fiel à sua tradição, mantendo a estrutura clássica do 172, uma decisão que parece ecoar a resistência e a confiabilidade que definem este ícone (AUTOENTUSIASTAS, 2020).

O Cessna 172 é mais do que apenas uma aeronave; é uma história de inovação, resiliência e paixão pela aviação. Sua jornada de 68 anos nos céus ilustra não apenas o progresso da engenharia aeronáutica, mas também a devoção daqueles que continuam acreditando na excelência e na tradição. O Cessna 172 não é apenas uma máquina voadora; é um símbolo duradouro da habilidade humana de voar alto e alcançar o inatingível, um ícone que transcende gerações e continua a inspirar os sonhos daqueles que olham para o céu com admiração (AUTOENTUSIASTAS, 2020).

2.2. Características da Aeronave

As características da aeronave Cessna 172S foram coletados no *site* do fabricante (AUTOENTUSIASTAS, 2020) e estão disponíveis na Tabela 1.

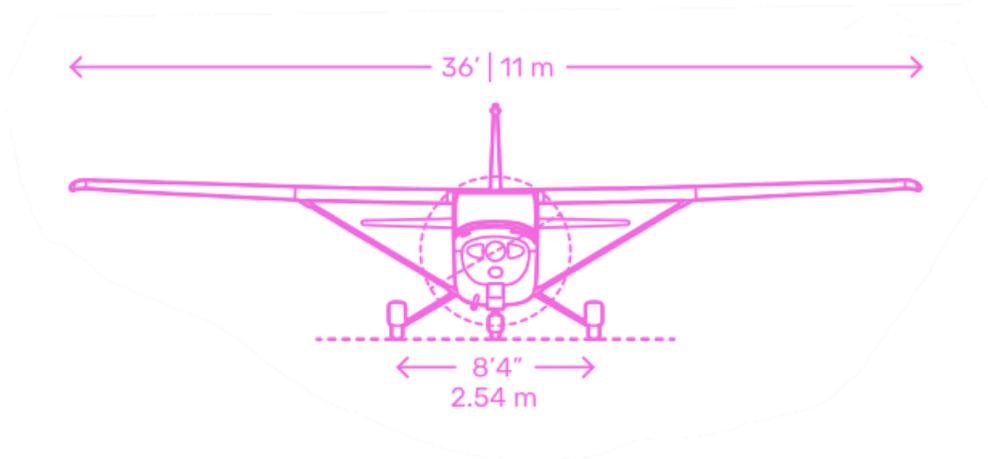
Tabela 1- Informação técnica da Aeronave

Fabricante	<i>Cessna Aircraft Company</i>
Nome da Aeronave	<i>Cessna 172 Skyhawk</i>
Nicho de Mercado	Treinamentos, Viagens e Patrulha
Capacidade de Passageiros	3
Motor	LYCOMING IO-360
Potência	180 hp @ 2.700 rpm
Comprimento	8,22 m
Envergadura	11,00 m
Altura	2,68 m
Peso Vazio	762 kg
Peso Máximo	1.157 kg
Capacidade Máx. de Combustível	213 L
Velocidade Máxima de Cruzeiro	302 km/h
Alcance	1.185 km

Fonte: Autoentusiastas (2020)

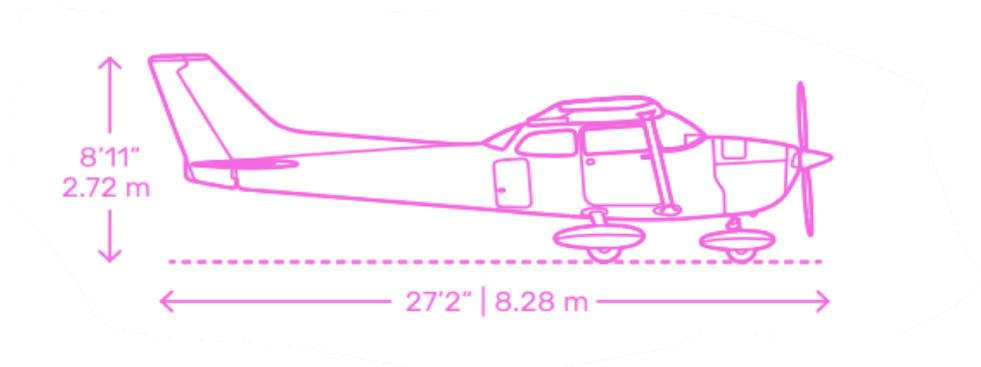
As Figuras 2, 3 e 4 demonstram as principais medidas da aeronave em estudo.

Figura 2 - Envergadura e distância entre as rodas – vista frontal.



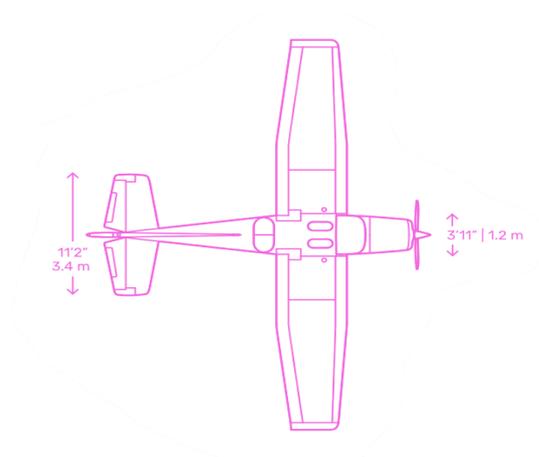
Fonte: Dimensions (2023)

Figura 3 - Comprimento e altura total - vista lateral



Fonte: Dimensions (2023)

Figura 4 - Medidas principais da aeronave - vista superior

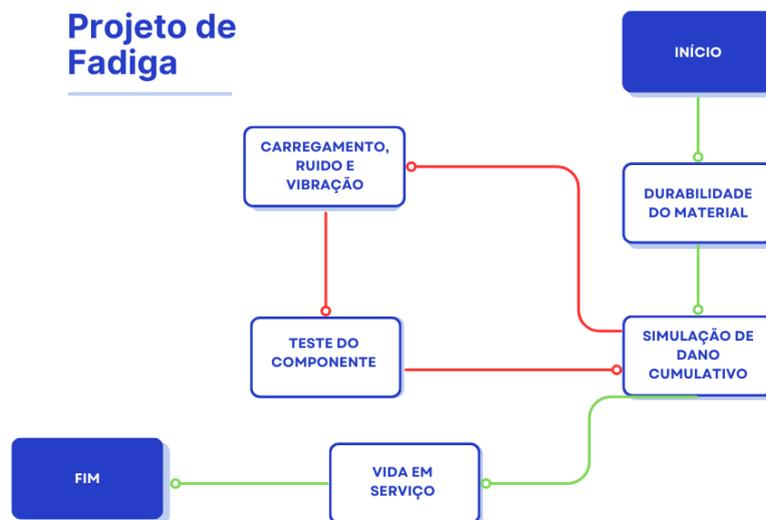


Fonte: Dimensions (2023)

2.3. Fadiga

A fadiga representa uma das principais causas de falhas mecânicas, sendo um dos aspectos mais destacados no desenvolvimento de estruturas (conforme simplificado na Figura 5). Conforme destacado por Rice (1988), um processo de projeto de fadiga envolve elementos fundamentais que desempenham um papel determinante na vida útil do projeto em serviço.

Figura 5 - Elementos básicos em um projeto de fadiga



Fonte: Autores (2024)

O fluxograma apresentado ilustra as etapas fundamentais do estudo de fadiga em componentes estruturais, organizando o processo desde a caracterização dos carregamentos até a análise da vida em serviço. Inicialmente, são avaliados os carregamentos, ruídos e vibrações que o componente enfrenta em condições reais, fornecendo subsídios para o estudo da durabilidade do material, considerando propriedades como resistência à fadiga e comportamento cíclico. Esses dados alimentam a simulação de dano cumulativo, na qual métodos como o de Miner são utilizados para prever o acúmulo de danos ao longo do tempo. Posteriormente, realiza-se o teste do componente para validar experimentalmente as previsões e, por fim, aplica-se a análise da vida em serviço, correlacionando os resultados com o desempenho do componente em campo.

O projeto de fadiga envolve a análise detalhada de como um componente ou estrutura se comporta sob a aplicação de cargas cíclicas ao longo do tempo. Segundo Callister Jr e Rethwisch (2018), a resistência à fadiga é afetada por uma série de fatores, incluindo o tipo de carga aplicada, a geometria do componente, e aspectos relacionados à superfície, como acabamento superficial, danos e tensões residuais.

Um dos elementos mais importantes no estudo da fadiga é a relação entre as tensões máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) e mínima ($\sigma_{\text{mín}}$), aplicadas ciclicamente ao componente. A tensão média (σ_m), que é a média entre essas duas tensões, exerce um papel fundamental no comportamento do material. Além disso, a amplitude de tensão ($\Delta\sigma$), que é a diferença entre $\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$, é essencial para prever o número de ciclos que o material pode suportar antes da falha.

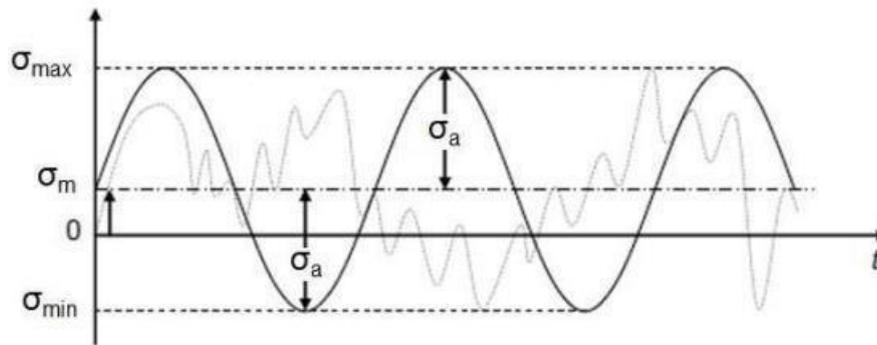
Outro fator crítico é a relação de tensão (R), definida pela razão entre a tensão mínima e a máxima ($R = \sigma_{\text{mín}} / \sigma_{\text{máx}}$). Essa relação é utilizada para caracterizar diferentes tipos de carregamento cíclico, como tensão completamente reversível ($R = -1$), onde a tensão mínima é igual em magnitude, mas oposta em direção à tensão máxima, ou tensão de amplitude constante, onde R é maior que 0.

O projeto de fadiga também envolve a escolha de um modelo matemático que descreva o comportamento cíclico do material. Um dos mais comuns é a curva S-N, que relaciona a amplitude de tensão com o número de ciclos até a falha. A vida útil à fadiga é altamente dependente do tipo de material e de fatores como o acabamento superficial, que pode influenciar diretamente a iniciação de trincas.

Assim, o processo de projeto contra fadiga inclui a identificação e minimização de fatores que aumentem a concentração de tensões, como geometria inadequada e falhas superficiais, além da aplicação de tratamentos que possam reduzir tensões residuais ou aumentar a resistência superficial do material.

Essa abordagem permite prever com mais precisão a vida útil dos componentes e otimizar sua confiabilidade em condições de serviço, assegurando que atendam aos critérios de resistência estabelecidos pelo projeto. A Figura 6 ilustra graficamente uma relação periódica e senoidal no tempo, na qual a amplitude de tensão é simétrica em relação a um ponto médio de tensão igual a zero.

Figura 6 - Tensão alternada entre uma tensão de tração máxima e uma tensão descompressão mínima



Fonte: Callister Jr & Rethwisch (2018)

No projeto de fadiga, conforme descrito por Callister Jr e Rethwisch (2018) e Araujo (2017), a representação do comportamento da fadiga é comumente feita por meio da curva S-N (tensão versus número de ciclos), que permite correlacionar a tensão alternada com o número de ciclos até a falha do material. Em um gráfico S-N, normalmente em escala logarítmica dupla, a tensão (σ) é representada no eixo vertical, enquanto o número de ciclos (N) aparece no eixo horizontal. Esse tipo de gráfico é fundamental para determinar a tensão limite de fadiga, que representa o valor abaixo do qual o material pode teoricamente suportar um número infinito de ciclos sem falha.

Quando se trata de materiais com comportamento viscoelástico, é importante considerar que a resposta do material sob carga cíclica pode resultar em relaxação de tensões, o que implica numa diminuição progressiva da carga aplicada ao longo do tempo de teste. Para analisar o comportamento de materiais sob condições de múltiplos níveis de carga, utiliza-se a Regra de Palmgren-Miner, ou regra de Miner, descrita pela equação (1):

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (1)$$

Essa abordagem, que pode ser refinada conforme Dowling (2019), é essencial para prever a vida útil de componentes submetidos a cargas variáveis. Dowling explora como a regra de Miner simplifica o processo de análise da fadiga ao somar as frações de ciclo individuais de diferentes amplitudes de tensão. No entanto, é

importante notar que, enquanto essa regra fornece uma boa aproximação, ela é conservadora e não considera efeitos como a sequência de carga, o que pode ser significativo em alguns casos.

Dessa forma, o projeto de fadiga não apenas requer a análise de tensões e ciclos, mas também o uso de ferramentas como a regra de Miner para considerar o acúmulo de dano ao longo de múltiplos blocos de carga. Essa análise é fundamental para garantir que o componente atenda aos requisitos de vida útil esperada, minimizando o risco de falhas catastróficas devido à fadiga acumulada.

2.4. Fadiga e Otimização do Trem de Pouso de Aeronaves

O trem de pouso de uma aeronave desempenha um papel essencial em termos de segurança e desempenho, sendo constantemente submetido a cargas cíclicas durante manobras como decolagens, pousos e taxiamento. Essas cargas induzem tensões que, ao longo do tempo, podem resultar na degradação do material, levando à falha por fadiga. Portanto, o estudo da fadiga e a otimização do projeto do trem de pouso são fundamentais para garantir a longevidade e a segurança estrutural da aeronave.

Segundo Dowling (2012), a fadiga é o processo pelo qual um material se deteriora sob a ação repetida de tensões ou deformações. Esse fenômeno ocorre em três fases principais: nucleação de trincas, propagação das trincas e, finalmente, a falha catastrófica. No caso do trem de pouso, os ciclos de carga são repetidos continuamente durante o uso normal da aeronave, tornando o estudo do comportamento em fadiga uma parte essencial do processo de design.

Para avaliar a vida útil de componentes estruturais sujeitos a cargas cíclicas, um dos métodos mais amplamente utilizados é o das curvas S-N (tensão versus número de ciclos). Essas curvas relacionam a magnitude das tensões aplicadas com o número de ciclos até a falha, sendo extremamente úteis para prever a durabilidade do componente. No caso do trem de pouso, podem-se identificar duas regiões principais de comportamento em fadiga: a fadiga de alta ciclagem (HCF) e a fadiga de baixa ciclagem (LCF).

A fadiga de alta ciclagem ocorre em situações nas quais as tensões aplicadas estão abaixo do limite de escoamento do material, o que é típico durante o uso regular da aeronave, como decolagens e pousos normais. Nesses casos, o trem de pouso pode

suportar milhões de ciclos antes de apresentar falhas, desde que as tensões estejam dentro de um limite aceitável. Por outro lado, a fadiga de baixa ciclagem é observada quando as tensões aplicadas são altas o suficiente para provocar deformações plásticas significativas, como durante aterrissagens bruscas ou manobras de emergência. Sob essas condições, a vida útil do componente é consideravelmente reduzida, e as tensões cíclicas aceleram o processo de falha.

No campo da análise de fadiga, Dowling (2012) propõe o uso de um modelo baseado em deformações, que considera a resposta local do material, especialmente em áreas sujeitas a concentrações de tensões. Componentes como o trem de pouso frequentemente apresentam regiões onde a tensão é concentrada, como articulações, furos ou pontos de fixação, que são locais propensos à nucleação de trincas. O método de análise baseado em deformações é eficaz para prever a vida útil do material nesses pontos críticos, pois leva em conta a plasticidade local que ocorre antes do surgimento de trincas.

Outro aspecto relevante discutido por Dowling (2012) é o comportamento de propagação de trincas por fadiga. A mecânica da fratura, disciplina que estuda o comportamento de trincas em materiais, é essencial para entender como pequenas falhas podem crescer com o tempo sob a ação de cargas cíclicas. Nesse contexto, a equação de Paris-Erdogan é amplamente utilizada para modelar a taxa de crescimento de trincas. No caso do trem de pouso, uma vez que uma trinca tenha se formado, a equação permite prever o número de ciclos que restam até a falha catastrófica. Essa informação é crucial para planejar inspeções periódicas e manutenções preventivas, aumentando a segurança da aeronave.

A concentração de tensões também é um fator que contribui significativamente para a vida útil do trem de pouso. Conforme explicado por Dowling (2012), a concentração de tensões ocorre em locais onde a geometria do componente induz uma distribuição desigual das tensões, como em regiões com entalhes, furos ou transições abruptas de seção. Essas áreas são mais suscetíveis à nucleação de trincas, uma vez que as tensões locais podem exceder os limites de resistência do material. Portanto, otimizar o design do trem de pouso, minimizando a concentração de tensões, é uma estratégia eficaz para prolongar a vida em fadiga. Isso pode ser feito, por exemplo, suavizando as transições geométricas, aumentando o raio de curvatura em regiões críticas ou reforçando as áreas mais vulneráveis à fadiga.

O comportamento elástico e plástico dos materiais também é crucial no desempenho de componentes sujeitos a altas tensões, como o trem de pouso. Dowling (2012) descreve a importância de compreender as deformações elásticas e plásticas ao projetar estruturas sujeitas a grandes cargas. Durante o regime elástico, o material retorna à sua forma original após a remoção da carga; no entanto, em situações de aterrissagens bruscas, o trem de pouso pode sofrer deformações permanentes, entrando no regime plástico. O conhecimento sobre o limite elástico e o comportamento plástico do material é essencial para assegurar que o trem de pouso tenha a capacidade de absorver choques e cargas inesperadas sem falhar completamente.

A seleção de materiais é outro ponto importante discutido, uma vez que a resistência à fadiga e à fratura depende diretamente das propriedades mecânicas dos materiais utilizados. Dowling (2012) destaca que materiais como ligas de alumínio e titânio são amplamente utilizados em trens de pouso devido à sua alta resistência específica, essencial para reduzir o peso total da aeronave sem comprometer a integridade estrutural. A escolha adequada de materiais para o trem de pouso deve também considerar a resistência à nucleação e propagação de trincas, fatores cruciais para prolongar a vida útil do componente.

Além da escolha de materiais, Dowling (2012) enfatiza a importância de tratamentos superficiais para aumentar a resistência à fadiga. Processos como o shot peening introduzem tensões compressivas na superfície do material, retardando a nucleação de trincas e aumentando a durabilidade do componente. Para o trem de pouso, constantemente exposto a condições adversas e ciclos de carga intensos, esses tratamentos são particularmente eficazes em prolongar sua vida útil e reduzir a necessidade de manutenção.

A aplicação dos conceitos de fadiga, mecânica da fratura, comportamento elástico e plástico, e seleção de materiais, conforme discutido por Dowling (2012), é essencial para otimizar o design e a manutenção de trens de pouso. A implementação de técnicas avançadas de previsão de vida em fadiga, a redução de concentrações de tensões, a escolha apropriada de materiais e o uso de tratamentos superficiais são estratégias fundamentais para garantir a segurança e a longevidade deste componente crítico na operação segura de aeronaves.

2.5. O Trem de Pouso

A concepção e o arranjo do trem de aterrisagem de uma aeronave são fundamentais para suportar as tensões resultantes das aterrisagens, deslocamentos em terra e decolagens. No estudo conduzido por Avinsah et al. (2013), a análise de elementos finitos é empregada para avaliar, de forma matemática, a segurança dos modelos de design nas condições operacionais específicas. Os autores consideram os ângulos de inclinação e rotação necessários durante as fases de decolagem e aterrisagem a fim de escolher a configuração mais adequada para o trem de pouso. No entanto, restringir demasiadamente o ângulo de inclinação durante a decolagem pode prejudicar a velocidade de decolagem, o comprimento necessário de pista e a capacidade de operar em condições de vento cruzado.

Quanto à avaliação da vida útil dos componentes sujeitos à fadiga, a literatura convencional utiliza apenas três tipos de cargas para a análise: cargas verticais, cargas de arrasto e cargas laterais. Cada uma dessas cargas provoca diferentes tipos de tensões no trem de pouso, tais como compressão, flexão e torção, e essa análise é conduzida através de softwares de elementos finitos (AVINASH, 2013).

Quando um material é submetido a condições de carga, ele passa por alterações microestruturais. De acordo com White (2015), ao longo de um período de dois anos, é esperado que a densidade do material visco plástico aumente quando submetido a cargas pesadas repetidas. Essas mudanças microestruturais frequentemente se manifestam como deformações horizontais isoladas em suas estruturas, notadamente evidenciadas por curvas nas ranhuras serradas nas áreas de frenagem de aeronaves de grande porte. Essa forma de deformação na estrutura pode ser um desencadeador de problemas de fadiga (ARAUJO, 2017).

Para avaliar a fadiga dos materiais, são usados parâmetros como o número de ciclos de vida e o fator de segurança. Em um estudo conduzido por Gokulraja et al. (2015), foram realizadas comparações entre uma liga de titânio, uma liga de alumínio e um material composto de carbono usando análises de fadiga e impacto. O autor usou como base o projeto do trem de pouso de um caça MIG-23, modelado no *software* CATIA e analisado com o auxílio do *Ansys*. Os resultados deste estudo indicaram que a liga de titânio é a mais adequada para aplicações em trens de pouso. Em comparação com as outras opções, a liga de titânio demonstrou um maior número de ciclos de vida e um fator de segurança superior, sugerindo que essa liga pode suportar cargas de impacto de forma mais eficaz quando usada em trens de pouso.

O trem de pouso é uma estrutura fundamental que não só tem a responsabilidade de suportar o peso de uma aeronave durante a aterrissagem, mas também desempenha um papel crucial na distribuição de carga durante o voo. Em virtude dessa dupla função, o trem de pouso está sujeito a diversos tipos de carregamentos. Conforme indicado no estudo realizado pelos pesquisadores Hernandez e Naressi (2017), o processo de fadiga de materiais é um fenômeno que resulta em falhas mecânicas locais devido a carregamentos alternados e variáveis, frequentemente de intensidade de muito inferior à de uma carga estática, culminando na ruptura da estrutura do material. Essa falha mecânica pode se manifestar na forma de trincas ou, em casos extremos, na completa ruptura, após um número suficiente de ciclos de carga. Vale ressaltar que a fadiga é um processo localizado, progressivo e acumulativo, influenciado pelas propriedades do material e da geometria da estrutura.

O ambiente em que o sistema de trem de pouso opera, incluindo o tipo de pavimento, também desempenha um papel significativo na possibilidade de ocorrerem acidentes. Araujo (2017) desenvolveu um método conceitual para avaliar a tensão de compressão do material, considerando a categoria de acidentes com base no tipo de pista. Além disso, abordou os requisitos e recomendações de RESA Airport Data Systems, que estabelece que as aeronaves devem operar em pistas livres de danos estruturais à aeronave ou de riscos para seus ocupantes. Isso é particularmente importante em aeroportos com pistas em condições desfavoráveis para pousos e decolagens.

Portanto, é evidente que o trem de pouso desempenha um papel crucial na segurança de uma aeronave e deve ser tratado de acordo com as diretrizes da RBAC 23, conforme delineado no parágrafo 23.571 no Anexo A – RBAC 23.571. Em outras palavras, a estrutura deve ser projetada para ser à prova de falhas, de modo que danos substanciais possam ser identificados e corrigidos durante a manutenção de rotina, inspeções ou operações de voo, antes que ocorra a falha dos elementos estruturais restantes, garantindo, assim, a integridade ao longo da vida útil da aeronave.

Raymer (1999) identifica a existência de seis tipos de configurações. Assim como Rodrigues (2011), ambos destacam que as configurações mais comuns são as de triciclo e convencional. No entanto, no caso da configuração triciclo, representada como a Configuração 2 na Figura 7, é possível dividir o sistema de trens em duas partes: o trem principal, localizado atrás do centro de gravidade da aeronave, e o trem de nariz, situado à frente do centro de gravidade e mais próximo do nariz da aeronave.

Figura 7 - Arranjos comuns de trens de pouso



Fonte: Sadraey (2023)

Em suma, a escolha do sistema de trem de pouso triciclo em aeronaves de pequeno porte é uma decisão estratégica que oferece controle direcional aprimorado, visibilidade clara e segurança operacional. Essa configuração não apenas simplifica as operações no solo, mas também contribui para pousos mais seguros e estáveis, prevenindo problemas como o "pilonar, movimento oscilatório ou vibratório de uma aeronave, motor ou componente devido a condições dinâmicas, como desequilíbrios ou ressonâncias." Para pilotos e fabricantes, a confiabilidade e eficácia do sistema triciclo tornam-no uma opção essencial, destacando sua importância no mundo da aviação de pequeno porte.

2.6. Os Principais Componentes em um Trem de Pouso

2.6.1 Amortecedores SHIMMY

Os amortecedores são unidades hidráulicas que suportam o peso da aeronave no solo, e protegem a estrutura absorvendo e dissipando as tremendas cargas de choque nos pousos, como mostrado na Figura 8.

Fica normalmente fixado na perna do trem de pouso do nariz. *Shimmy* é a vibração direcional do trem do nariz que pode ocorrer durante a corrida na decolagem ou em outras situações. O arranjo triciclo do trem de pouso é formado por muitos conjuntos e partes.

Estes consistem em: amortecedor a óleo/ar, unidades de alinhamento das pernas principais, unidades de suporte, mecanismo de segurança e retenção, mecanismo de proteção da perna de força auxiliar, sistema de direção da roda do nariz, rodas da aeronave, pneus, câmara de ar e sistema de freio da aeronave (RIZZO, 2017).

Figura 8 - Amortecedor shimmy



AMORTECEDORES DE VIBRAÇÃO (SHIMMY)

Fonte: Rizzo (2017)

2.6.2 Conjunto de Rodas

Esse conjunto tem a finalidade de permitir o deslocamento do avião no solo e a sua frenagem, como mostrado na Figura 9. Ele é constituído pelas seguintes partes:

Figura 9 - Conjunto de rodas



Fonte: Aviadores (1980)

2.6.2.1 Pneus

Na aviação, além dos pneus com câmara e sem câmara, como mostrado na Figura 10, existem tipos específicos de pneus para diferentes condições de pista. Pneus de alta pressão são usados em pistas pavimentadas duras, enquanto pneus de baixa pressão são ideais para pistas macias, como gramados e terra solta. Muitos pneus e câmaras de aeronaves danificados podem ser reparados eficientemente, e pneus muito usados ou deformados podem ser recauchutados, proporcionando uma nova banda de rodagem semelhante à original. Essas práticas, que economizam consideráveis quantias em dinheiro para os operadores, envolvem o condicionamento seguro de pneus descartados, permitindo sua reutilização repetida, contribuindo assim para a eficiência econômica e sustentabilidade na aviação.

Danos mais comuns nos pneus: Cortes, separação da banda e formação de bolhas, sulcos trincados ou cortes nas nervuras, descamação e rebarbas, desgaste por derrapagem, reversão da borracha, cortes estriados (chevron) e lonas com poimento (RIZZO, 2017).

Figura 10 - Pneu utilizado no trem de pouso Cessna 172S



Fonte: Rizzo (2017)

2.6.2.2 Rodas

Existem três tipos fundamentais de construção para as rodas de aviões: flanges independentes, meias-rodas e cubo-e-flange. Cada um desses *designs* tem suas características distintas, como mostrado na Figura 11, todos incorporando componentes leves e soluções de engenharia simplificadas para garantir eficiência e segurança nas operações aéreas (RIZZO, 2017).

Figura 11 - Rodas da aeronave Cessna 172S



Fonte: Rizzo (2017)

2.6.2.3 Flanges Independentes

As rodas com flanges independentes consistem em duas partes separadas: a roda propriamente dita e a flange, que é acoplada à roda, como mostrado na Figura 12. Este *design* permite uma montagem flexível, facilitando a manutenção e a substituição de partes individuais. A característica modular dos flanges independentes oferece uma maior flexibilidade na configuração das rodas de acordo com as necessidades específicas da aeronave (RIZZO, 2017).

Figura 12 - Flanges independentes



Fonte: Rizzo (2017)

2.6.2.4 Meias-Rodas

As meias-rodas são construídas como um único componente semicircular, como mostrado na Figura 13, oferecendo uma estrutura contínua e uniforme. Esse

design é especialmente conhecido por sua simplicidade e resistência. A ausência de conexões complexas ou junções torna as meias-rodas robustas e duráveis. Além disso, essa configuração é frequentemente adotada em aeronaves de pequeno porte, onde a leveza e a praticidade são essenciais (RIZZO, 2017).

Figura 13 - Meias-rodas



Fonte: Rizzo (2017)

2.6.2.5 Cubo-e-Flange

As rodas do tipo cubo-e-flange apresentam um cubo central conectado a flanges nas extremidades, como mostrado na Figura 14. O cubo é a parte central que se encaixa no eixo da aeronave, enquanto os flanges, localizadas nas extremidades, oferecem suporte às peças de borracha que compõem os pneus da roda. Esse design é eficaz para distribuir o peso de maneira uniforme e proporcionar uma estrutura estável e resistente para as rodas da aeronave (RIZZO, 2017).

Figura 14 - Cubo-e-flange



Fonte: Rizzo (2017)

2.6.3 Freios

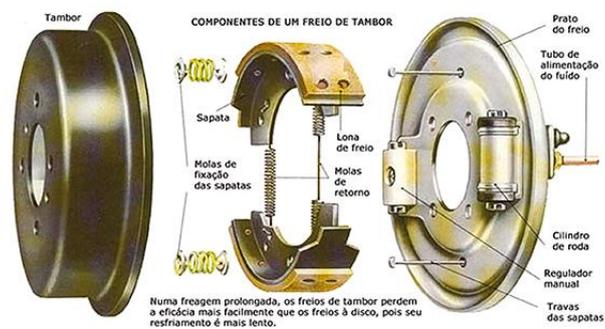
Os freios das aeronaves são acionados pelos pedais do leme, permitindo não apenas a frenagem normal, mas também a realização de curvas fechadas em solo, especialmente em aeronaves de pequeno porte. O piloto utiliza a técnica de frenagem diferencial, aplicando o freio apenas no lado da aeronave em que a curva é realizada, junto com o pedal do leme. Esta ação movimentava o leme de direção e o trem do nariz, proporcionando controle durante o voo e no solo. Ao pressionar a ponta do pedal, o piloto aciona o cilindro-mestre, enviando fluido hidráulico aos freios das rodas por meio de um tubo. Para frear apenas um lado, é necessário manter o leme neutro e calçar o pedal oposto. Essa técnica é essencial para manobras precisas e seguras durante o taxiamento e outras operações em solo (RIZZO, 2017).

Os freios mais usados são os:

- Freios a tambor normalmente para aeronaves de pequeno porte, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Freio a tambor

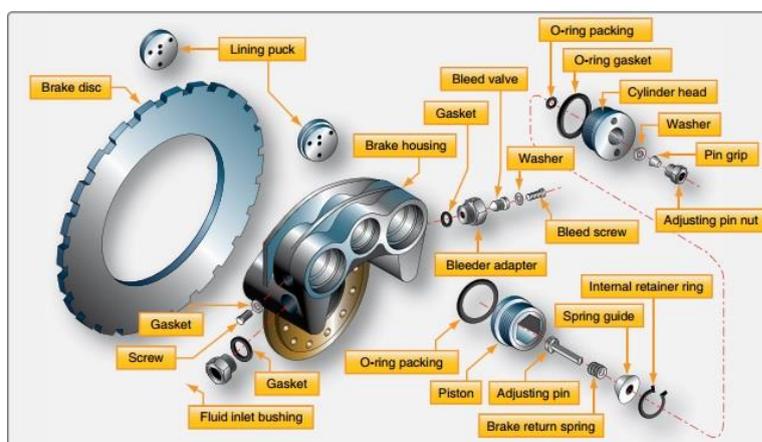
Componentes de um freio de tambor



Fonte: Brasil Mecânico (2016)

- Freios a disco usado a aeronaves de grande porte, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Freio a disco



Fonte: Brasil Mecânico (2016)

2.6.4 Garfo

O garfo do trem de pouso é uma componente crucial localizada na parte inferior do amortecedor das aeronaves, como mostrado na Figura 17, desempenhando múltiplas funções essenciais para a segurança e a eficiência operacional. Em primeiro lugar, ele serve como um sistema de absorção de impacto fundamental durante o processo de aterrissagem, atuando como um amortecedor que suaviza o impacto quando a aeronave toca o solo. Esta função é fundamental para assegurar a integridade estrutural da aeronave e o conforto dos passageiros e tripulação a bordo, proporcionando uma aterrissagem suave e controlada.

Além disso, o garfo do trem de pouso oferece suporte e estabilidade à roda da aeronave enquanto está no solo. Ele é projetado para suportar o peso da aeronave, garantindo uma base sólida e segura durante o taxiamento, a decolagem e o pouso. Esta estabilidade é crucial para manter o equilíbrio da aeronave e facilitar as operações de solo, especialmente em condições adversas.

Em síntese, o garfo do trem de pouso desempenha um papel vital na segurança e na funcionalidade das operações de aterrissagem e taxiamento das aeronaves. Suas funções de absorção de impacto, suporte estrutural, direcionamento preciso e durabilidade são cruciais para assegurar um desempenho seguro e confiável das aeronaves, refletindo a importância crítica dessa peça na aviação (RIZZO, 2017).

Figura 17 - Garfo



Fonte: Rizzo (2017)

2.7. Materiais do Trem de Pouso

Os componentes do trem de pouso do Cessna 172S, uma aeronave amplamente utilizada para treinamento e voos recreativos, são fabricados com materiais cuidadosamente selecionados para garantir segurança, confiabilidade e desempenho. Os principais materiais utilizados são o aço de liga e a liga de alumínio 7075, ambos escolhidos por suas propriedades mecânicas superiores.

Os aços de liga, como o SAE 4130 e o SAE 4340, são amplamente aplicados devido à sua resistência à tração, dureza e resistência à corrosão. Essas ligas metálicas, compostas por ferro, carbono e elementos como cromo, níquel, molibdênio e vanádio, são projetadas para suportar cargas dinâmicas e estáticas significativas. No trem de pouso, esses aços são usados em componentes críticos, como as pernas principais, que enfrentam altas cargas durante pousos e taxiamentos.

Por outro lado, a liga de alumínio 7075 é escolhida pela sua alta resistência combinada com baixo peso. Essa liga, composta principalmente por alumínio e zinco, com adição de magnésio, cobre e pequenas quantidades de cromo, destaca-se pela sua excelente relação resistência/peso, tornando-a ideal para partes que exigem leveza sem abrir mão da robustez estrutural. O material pode ser tratado termicamente, como na têmpera T6, para atingir níveis de desempenho semelhantes aos de alguns aços, mas com uma significativa redução de peso, o que contribui para a eficiência da aeronave.

Apesar de a liga 7075 apresentar menor resistência à corrosão em comparação com outros materiais, tratamentos de superfície, como anodização ou revestimentos protetores, podem aumentar sua durabilidade mesmo em condições adversas.

Em resumo, a combinação do aço de liga e da liga de alumínio 7075 no trem de pouso do Cessna 172S é essencial para atender aos requisitos de segurança, resistência e eficiência. Enquanto o aço é usado para suportar as maiores cargas, o alumínio contribui para a redução do peso, mantendo o desempenho operacional da aeronave em alto nível (COLD JET, 2019; DAVIS, 1999).

2.8. Método de Elementos Finitos (MEF)

Avanços na computação tornaram as simulações de colisão de aeronaves espaciais usando análise de elementos não linear, dinâmica e transitória mais viáveis. Desenvolveu-se um modelo de trem de pouso simples, preciso na simulação de absorção de energia sem adicionar complexidade excessiva. Códigos de simulação podem certificar assentos e aeronaves durante o projeto da estrutura, prever respostas de ocupantes e avaliar cenários de colisão.

Muitas aeronaves agora têm trens de pouso com absorção de energia como parte do sistema de mitigação de colisão. A precisão da aceleração da fuselagem depende das reduções de velocidade ou mudanças na atitude resultantes do movimento do trem de pouso. Apesar de causar impactos, as acelerações durante o movimento geralmente não causam danos estruturais significativos. Foi desenvolvido um método para modelar o efeito do trem de pouso sem adicionar complexidade excessiva ao modelo de elementos finitos. Os resultados das simulações foram correlacionados com dados experimentais previamente adquiridos. A formulação do Método dos Elementos Finitos (MEF) exige uma equação do cálculo de matriz de rigidez. Isso é exemplificado na Equação 2 (AZEVEDO, 2003).

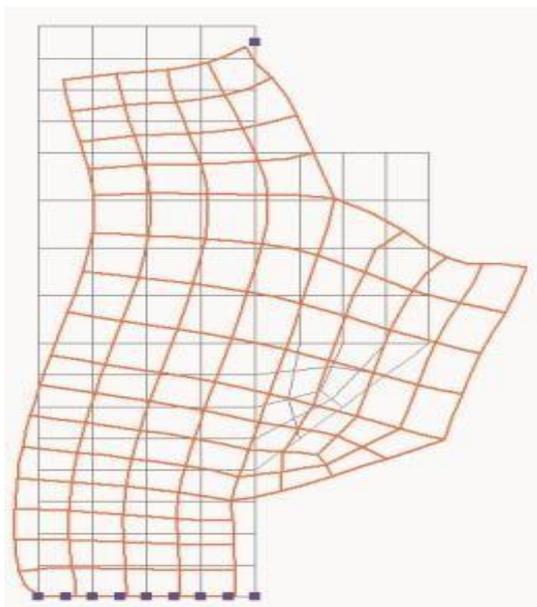
$$[\hat{k}] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Na Equação 3 pressupõe-se que:

$$V = \sum_{i=1}^n V_{\hat{i}} \quad (3)$$

Se todos os integrais nos subdomínios V_i puderem ser calculados, basta somar os resultados do segundo membro da Equação 2 para obter o integral sobre todo o domínio. Cada V_i representa um elemento finito de geometria simples (como um segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro ou paralelepípedo). O somatório na Equação 2 resulta na operação conhecida como montagem, que guarda semelhanças com aquela realizada em estruturas reticuladas (AZEVEDO, 2003).

Figura 18 - Malha deformada representada sobre a estrutura indeformada



Fonte: Azevedo (2003)

Segundo Azevedo (2003), na Figura 18 está representada a malha deformada pela ação das forças aplicadas à estrutura. Para permitir uma melhor visualização dos deslocamentos.

Como referência, é também representada a malha original indeformada (AZEVEDO, 2003).

2.9. CAD

O *software* CAD (Desenho Assistido por Computador) é essencial para a criação de desenhos técnicos em Engenharia e Arquitetura, oferecendo diversas ferramentas para atender a diferentes finalidades. A evolução do CAD remonta aos princípios da Matemática Euclidiana, estabelecida por volta de 350 a.C., influenciando profundamente o desenvolvimento computacional subsequente (AMARAL, FILHO, 2010).

Nos anos 1960, Ivan Sutherland revolucionou a computação gráfica ao criar o *Sketchpad*, considerado o primeiro *software* de CAD, que permitia a interação direta entre usuário e computador através de uma *Light pen*, tornando-se um marco na área (SUTHERLAND, 2003). Contudo, já em 1957, o Dr. Patrick J. Harantty havia desenvolvido o primeiro sistema CAM, sendo reconhecido como o fundador da era dos sistemas CAD/CAM (AMARAL, FILHO, 2010).

Durante os anos iniciais, o uso do CAD era restrito a indústrias como a aeroespacial e automobilística, devido aos altos custos dos computadores necessários para rodar esses sistemas. Nos anos 1960 e 1970, instituições como o MIT e empresas como *Lockheed* e *McDonnell-Douglas* se destacaram no desenvolvimento de sistemas CAD 2D, com o surgimento do CAD 3D, notavelmente o CATIA, criado pela *Avionics Marcel Dassault* em 1977 (AMARAL, FILHO, 2010).

Nos anos 1980, a *Autodesk* lançou o AutoCAD em 1982, o primeiro programa de CAD desenvolvido para PCs, enquanto a *Avionics Marcel Dassault* lançava a segunda versão do CATIA, distribuída pela IBM. Ao mesmo tempo, surgiram as estações de trabalho UNIX, voltadas para aplicações técnicas. A década de 1990 marcou a chegada do *SolidWorks 95*, compatível com o sistema operacional *Windows NT*, o que reduziu significativamente os custos em relação aos sistemas UNIX concorrentes, ampliando o acesso ao CAD (AMARAL, FILHO, 2010).

A partir do final dos anos 1990, com o crescimento da *internet*, o CAD tornou-se ainda mais acessível, incluindo a disponibilidade de versões gratuitas (AMARAL, FILHO, 2010). A tecnologia continuou a evoluir até os dias de hoje, tornando-se uma ferramenta amplamente utilizada em diversos setores industriais.

2.10. ANSYS

O ANSYS é um *software* de simulação de engenharia amplamente utilizado para análise de elementos finitos (FEA), ajudando engenheiros e projetistas a prever o comportamento de produtos e sistemas sob diferentes condições, sem a necessidade de protótipos físicos. Fundado em 1970 por John A. Swanson, o ANSYS começou como uma solução para análise estrutural avançada e, desde então, expandiu-se para incluir simulações de eletromagnetismo, termodinâmica e outros aspectos importantes da engenharia. Atualmente, a ANSYS, *Inc.* é líder global em *software* de simulação, atendendo a diversas indústrias, como a aeroespacial, automotiva e de energia.

As principais aplicações do ANSYS incluem análise estrutural, que avalia tensões e falhas em componentes e estruturas; análise térmica, que estuda a distribuição de temperaturas e fluxos de calor; análise de eletromagnetismo, para campos eletromagnéticos e suas interações; e análise de fadiga, que prevê a durabilidade e vida útil de componentes submetidos a ciclos de carga repetidos. Suas vantagens incluem precisão, confiabilidade e a capacidade de integrar múltiplas disciplinas, proporcionando uma visão abrangente dos sistemas e suas interações. Ele é uma ferramenta essencial para otimização de projetos, resultando em economia de recursos e melhor desempenho, além de permitir simulações de condições extremas que seriam difíceis de testar fisicamente.

Por outro lado, o custo do ANSYS pode ser elevado, exigindo considerável investimento, especialmente para pequenas empresas. A complexidade das ferramentas pode demandar treinamento, e simulações detalhadas requerem *hardware* avançado e alto poder computacional. No setor de segurança aérea, o ANSYS é essencial na recriação e análise de cenários de acidentes, contribuindo para uma maior segurança ao permitir que engenheiros identifiquem falhas e melhorem os sistemas.

Para um trem de pouso, como o de uma aeronave Cessna, o ANSYS facilita a otimização do *design* ao simular condições extremas de pouso e decolagem, identificando áreas de maior tensão e ajustando o *design* para evitar falhas. Isso ajuda a garantir que o trem de pouso seja resistente e leve, o que melhora o desempenho da aeronave e reduz o consumo de combustível. Na análise de fadiga, o ANSYS permite prever o comportamento do trem de pouso ao longo do tempo, auxiliando no planejamento de manutenção e prevenção de falhas inesperadas, o que aumenta a segurança da aeronave.

2.11. Aplicação do Ansys na Otimização do Trem de Pouso

A análise de fadiga é um aspecto fundamental no desenvolvimento e na otimização do trem de pouso de aeronaves devido às condições operacionais rigorosas às quais este componente é submetido, incluindo cargas cíclicas, vibrações constantes e variações de carga ao longo de sua vida útil. Conforme Schijve (2009), a fadiga é um fenômeno complexo que envolve a nucleação e propagação de trincas, as quais, se não controladas, podem resultar em falhas catastróficas no material. Essas falhas ocorrem, principalmente, devido ao enfraquecimento gradual que o material

sofre ao longo de sucessivos ciclos de carga, resultando em trincas que se iniciam em regiões críticas com alta concentração de tensões, como articulações e transições de seção. Por isso, identificar antecipadamente essas regiões vulneráveis é essencial para prevenir falhas, garantir a segurança do trem de pouso e, por consequência, da aeronave. A identificação dessas áreas possibilita um planejamento de manutenções preventivas mais eficaz, assegurando a durabilidade do componente e prolongando sua vida útil.

A utilização de ferramentas de simulação, como o Ansys, permite replicar as condições reais enfrentadas pelo trem de pouso e analisar a distribuição de tensões no componente. Através da simulação, é possível utilizar curvas S-N (tensão versus número de ciclos), que ajudam a prever a durabilidade dos materiais submetidos a cargas cíclicas e a entender como a tensão aplicada se relaciona com o número de ciclos até a falha. Essas curvas são essenciais para o planejamento de manutenção e para estabelecer limites de segurança. No contexto do trem de pouso, as curvas S-N permitem definir intervalos de manutenção e prever a vida útil do componente, aspectos críticos para a segurança e o desempenho da aeronave. O uso do Ansys oferece uma vantagem significativa, pois possibilita o cálculo e a visualização detalhada de como essas tensões se distribuem durante as operações de decolagem, pouso e taxiamento, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões de *design* e de estratégias de manutenção.

Outro ponto relevante na análise de fadiga é a compreensão da propagação de trincas, que ocorre após a sua nucleação inicial. A equação de Paris-Erdogan, que relaciona a taxa de crescimento da trinca ao estresse cíclico aplicado, é uma ferramenta importante nesse contexto. Esta abordagem possibilita a previsão do avanço de trincas ao longo do tempo, permitindo que engenheiros possam programar inspeções regulares e intervenções de manutenção antes que a trinca atinja um tamanho crítico que comprometa a integridade do componente. No Ansys, é possível simular a propagação de trincas em estruturas complexas, como o trem de pouso, e testar diferentes cenários de carga, contribuindo para que os engenheiros compreendam melhor como essas falhas podem se desenvolver ao longo do ciclo de vida do componente. Dessa forma, a análise da propagação de trincas é essencial para evitar falhas catastróficas e para garantir que as estruturas atendam aos rigorosos padrões de segurança aeronáutica.

Além da análise estrutural, a resistência à fadiga pode ser melhorada por meio de tratamentos superficiais e otimização de peso. Técnicas como o *shot peening* são recomendadas para aumentar a durabilidade do trem de pouso, criando uma camada de tensões compressivas na superfície do material, o que retarda a nucleação e a propagação de trincas. A otimização de peso também desempenha um papel crucial na indústria aeronáutica, onde a redução de peso gera ganhos de eficiência de combustível e diminui os custos operacionais. No Ansys, a aplicação de otimização topológica permite identificar áreas do componente onde o material pode ser removido ou substituído sem comprometer a resistência estrutural. Além disso, a escolha de materiais adequados, como ligas de alumínio e titânio, que combinam alta resistência com baixo peso, é crucial para um design eficiente e seguro (Dowling, 2012). Assim, o uso de ferramentas avançadas de simulação, aliado à teoria de fadiga, fornece uma base sólida para o desenvolvimento de componentes mais seguros e eficientes na indústria aeronáutica moderna.

2.12. Aplicação da Mecânica da Fratura no Trem de Pouso

A mecânica da fratura é uma disciplina fundamental na engenharia, especialmente na análise e previsão do comportamento de trincas em materiais estruturais. Sua relevância se torna ainda mais evidente no contexto do trem de pouso de aeronaves, uma vez que essa estrutura está sujeita a grandes forças e ciclos de fadiga durante as operações de decolagem, pouso e manobras em solo. A compreensão e análise das trincas são cruciais não apenas para determinar a vida útil do componente, mas também para assegurar a segurança geral da aeronave.

Fundamentos da Mecânica da Fratura

A mecânica da fratura estuda o crescimento e a propagação de trincas em materiais sob diferentes condições de carga. Como discutido por Broek (1989), essa área do conhecimento combina teoria, experimentação e aplicação prática. Um dos aspectos centrais dessa abordagem é a capacidade de prever o crescimento de trincas existentes, sendo este um fator essencial para evitar falhas catastróficas. Para tal, são levados em consideração parâmetros como o tamanho inicial da trinca, a taxa de crescimento e as tensões aplicadas.

Uma das principais contribuições de Broek é a introdução da equação de

crescimento da trinca de Paris, que relaciona a taxa de crescimento da trinca (da/dN) com a amplitude da tensão (ΔK). Essa equação (4), dada por:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

Onde C e m são constantes que dependem das propriedades do material e das condições ambientais. Esta relação fornece um modelo preditivo para o comportamento de materiais sujeitos a tensões repetidas. A amplitude da tensão, representada por ΔK , é um fator crucial no crescimento da trinca, uma vez que as flutuações cíclicas de carga podem resultar em um aumento significativo do tamanho da trinca ao longo do tempo.

A previsão do crescimento de trincas é vital, pois possibilita o estabelecimento de limites operacionais seguros. Por exemplo, ao monitorar uma trinca em um trem de pouso, pode-se determinar o momento apropriado para a realização de manutenção, evitando que a trinca alcance um tamanho crítico que comprometa a integridade estrutural. O entendimento das características do material, como sua resistência à fratura e tenacidade, é crucial para a tomada de decisões informadas sobre a operação e manutenção do trem de pouso.

Análise de Falhas e Prevenção

A análise de falhas é crucial para garantir a segurança e a funcionalidade do trem de pouso de aeronaves. Anderson (2017) enfatiza que técnicas adequadas de previsão e monitoramento de trincas podem minimizar ou evitar falhas catastróficas. Identificar áreas propensas a falhas permite aplicar métodos de otimização e fortalecer a integridade estrutural. Além disso, fatores ambientais, como corrosão e temperatura, são considerados, e técnicas de inspeção não destrutiva (como ultrassom e raios X) desempenham um papel importante. A implementação de sistemas de monitoramento contínuo e manutenção preditiva contribui para a detecção precoce de problemas e maior confiabilidade operacional.

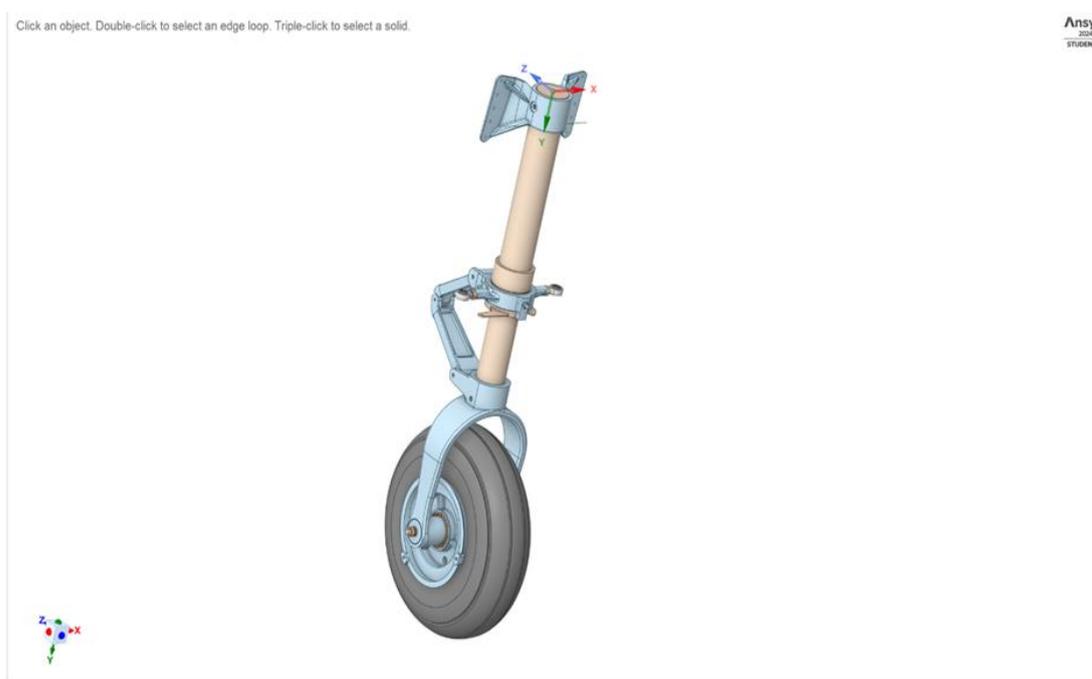
Adicionalmente, a aplicação de modelos de simulação de falhas, como os disponíveis no Ansys, permite prever o comportamento do trem de pouso sob diferentes cenários de carga e condições ambientais. Esses modelos facilitam a identificação de possíveis pontos de falha antes mesmo de ocorrerem, permitindo

ajustes de *design* e a seleção de materiais mais adequados. A análise de falhas no Ansys, em conjunto com dados de sensores de monitoramento, proporciona uma visão mais detalhada sobre o desempenho do componente, ajudando a implementar melhorias contínuas e a adotar práticas de manutenção preditiva mais eficazes, o que, em última análise, eleva a segurança e reduz os custos de operação ao longo do ciclo de vida da aeronave.

3. DESENVOLVIMENTO

Para dar início ao desenvolvimento da análise de fadiga, um conjunto de trem de pouso CAD foi modelado seguindo as medidas do trem de pouso de nariz original do cessna 172 skyhawk como demonstrado na figura abaixo (Figura 19), posteriormente, será realizada a extração do garfo do trem de pouso de nariz e a adição do material.

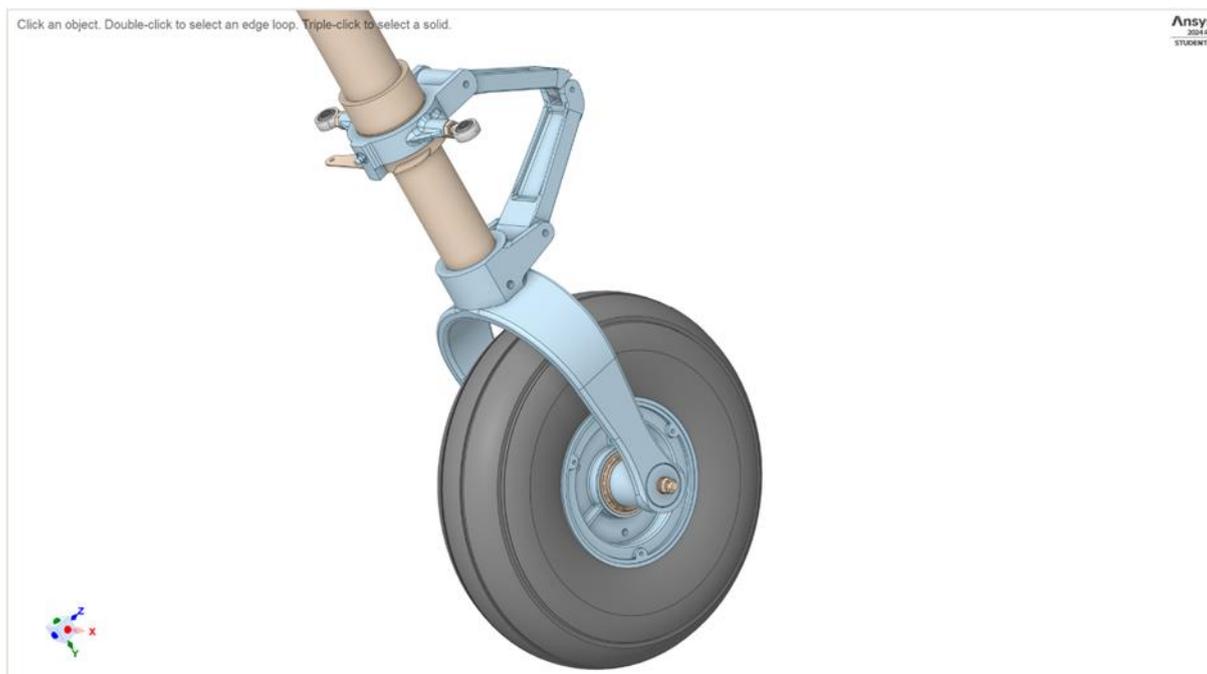
Figura 19 - Conjunto trem de pouso



Fonte: Autores (2024)

A peça extraída em questão trata-se do garfo do trem de pouso de nariz, responsável por acoplar conjunto de amortecimento com a roda e pneu da aeronave, ambos os componente fixados utilizando um eixo e um rolamento como demonstrado na imagem abaixo (Figura 20).

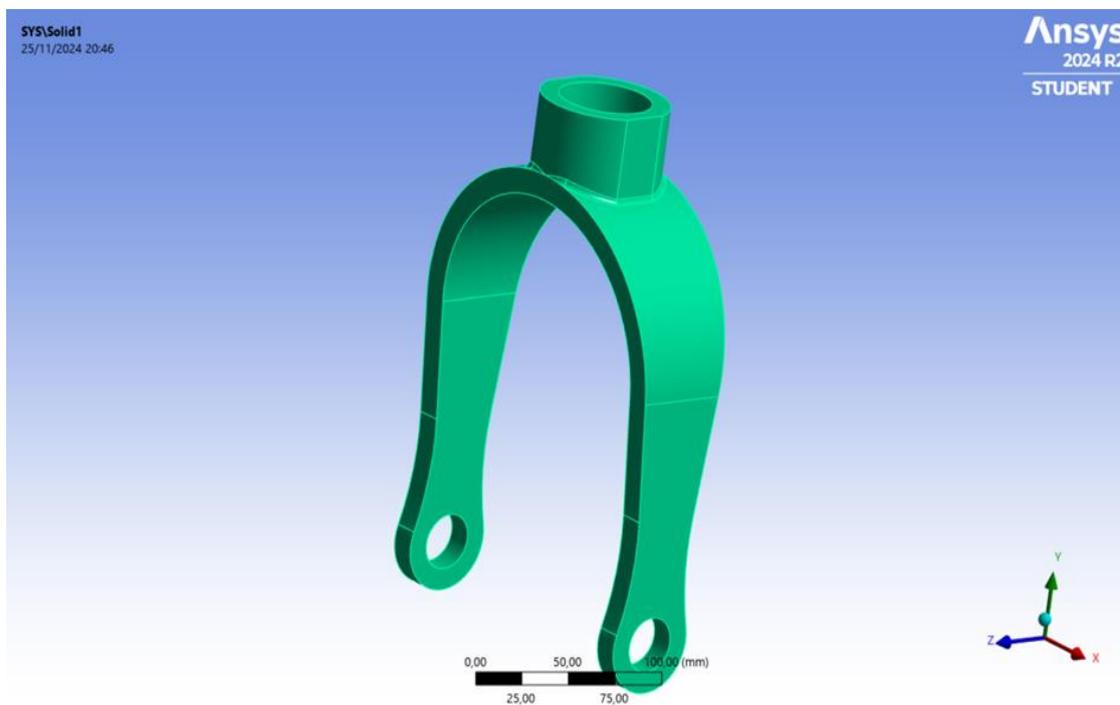
Figura 20 - Garfo a ser extraído do conjunto



Fonte: Autores (2024)

A peça extraída do conjunto passará pela adição do material que irá compor o sólido em questão, o material utilizado para a confecção do sólido foi a liga de alumínio 7075-T6, popularmente chamado de alumínio aeronáutico esse material possui grande capacidade de resistência a forças como tração, compressão e cisalhamento e sendo uma liga leve o que o torna um material muito utilizado na indústria aeronáutica para a confecção de peças que precisam de uma grande resistência para suportar as cargas do voo como por exemplo: fuselagem, empenagens, trem de pouso e asas.

Figura 21 - Adição do material ao garfo

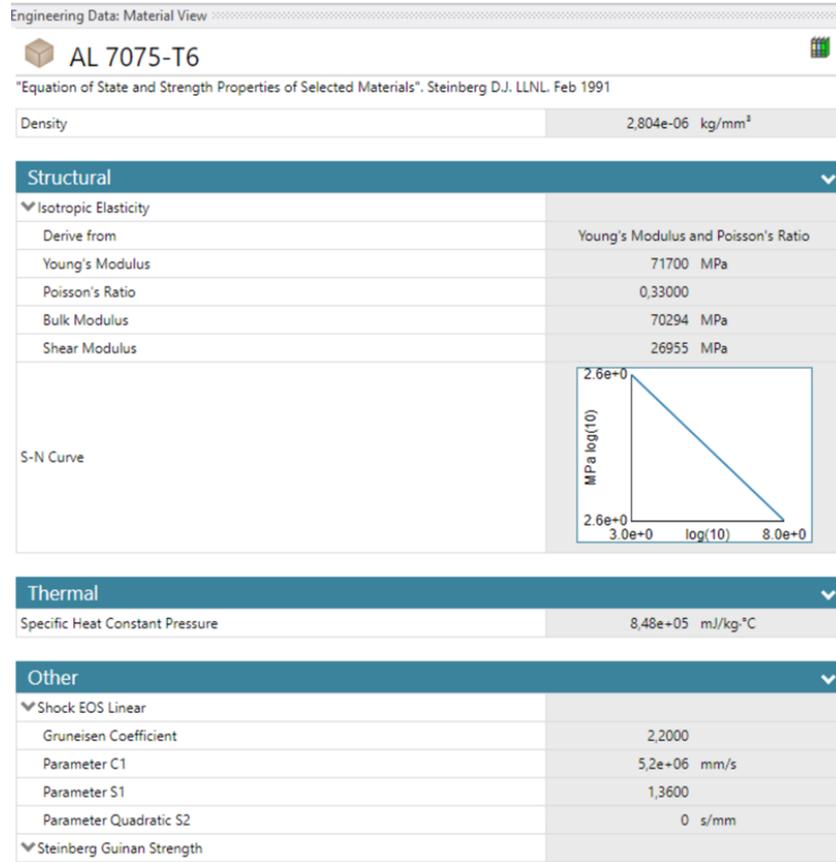


Fonte: Autores (2024)

Algumas características da liga de alumínio 7075-T6 estão presentes na biblioteca do ANSYS como por exemplo: *S-N Curve*, *Shock EOS Linear*, *Steinberg Guinan Strength*, *Shear Modulus*, como mostrado na Figura 22.

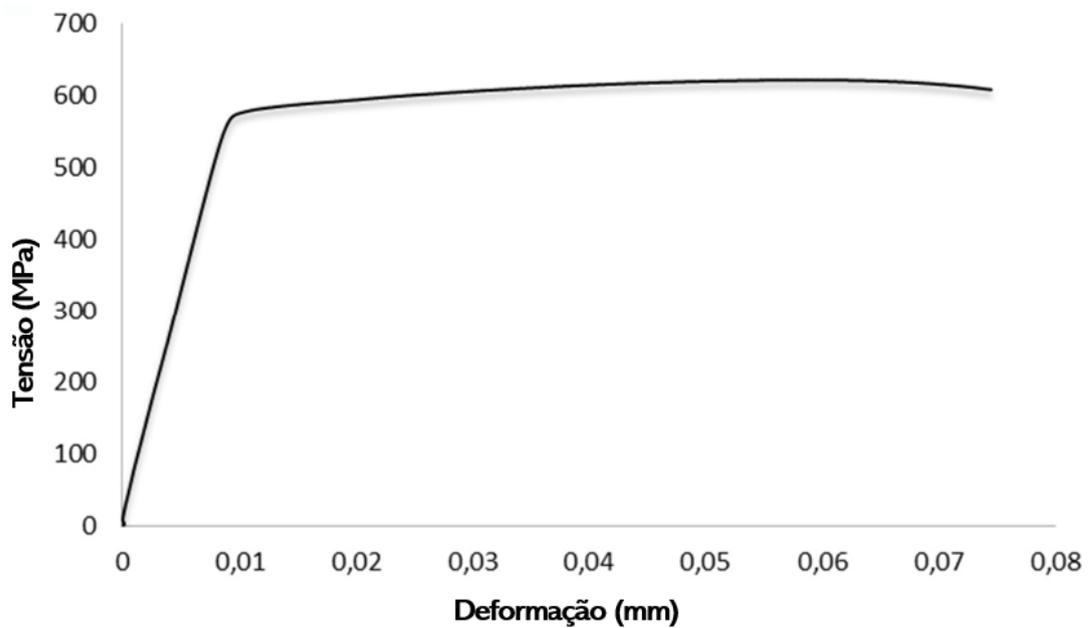
Também será necessário um gráfico tensão deformação da liga de alumínio 7075 – T6 para a comparação com os resultados da análise estática da carga limite e carga *ultimate*, como mostrado na Figura 23.

Figura 22 - Propriedades do material



Fonte: Autores (2024)

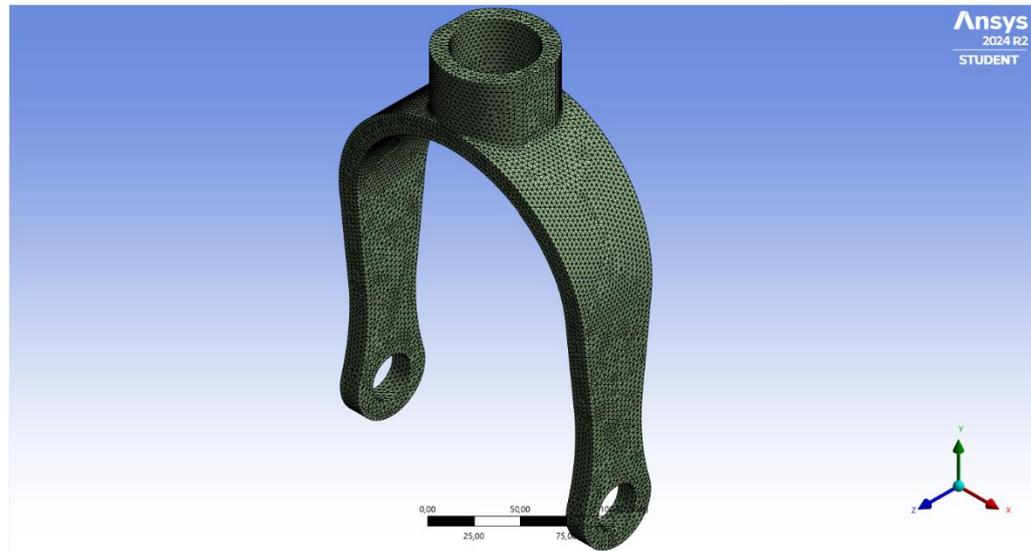
Figura 23 - Gráfico tensão deformação do alumínio 7075-T6



Fonte: XIX CONEMI (2019)

Após a extração do garfo do trem de pouso do conjunto e a adição do material no sólido, a malha de elementos finitos foi adicionada a peça para que a simulação de fadiga fosse realizada, os elementos constituintes da malha, mostrado na Figura 24, possuem um tamanho de 3mm como demonstrado na imagem, Figura 25.

Figura 24 - Confeccção da malha



Fonte: Autores (2024)

Figura 25 - Propriedade da malha

<i>Scope</i>	
<i>Geometry</i>	<i>1 Body</i>
<i>Definition</i>	
<i>Element Size</i>	<i>3, mm</i>
<i>Statistics</i>	
<i>Nodes</i>	<i>206021</i>
<i>Elements</i>	<i>137664</i>

Fonte: Autores (2024)

Para a obtenção de uma malha bem projetada, é preciso analisar a espessura da peça a ser simulada, pois, a dimensão dos elementos está relacionada à espessura da peça em questão, neste caso, a malha possui 3 milímetros de tamanho dos elementos.

3.1. CARGA LIMITE

Para a análise de fadiga é necessário a análise de carregamento dinâmico máximo de duas cargas: a carga limite e a carga *ultimate*, sendo a carga limite responsável pela análise de fadiga e a carga ultimate responsável pela simulação da maior força exercida pela peça em questão.

Para realizar uma análise fidedigna, é preciso determinar o comportamento das forças aplicadas sobre a peça, para isso, será necessário realizar um input manual no sistema através da confecção de um gráfico baseado na fórmula de carregamento dinâmico máxima contida no livro de autor Dr. Jan Roskam representada pela Figura 26 e Tabela 2 a seguir:

Figura 26 - Gráfico de distribuição de forças (Roskam)

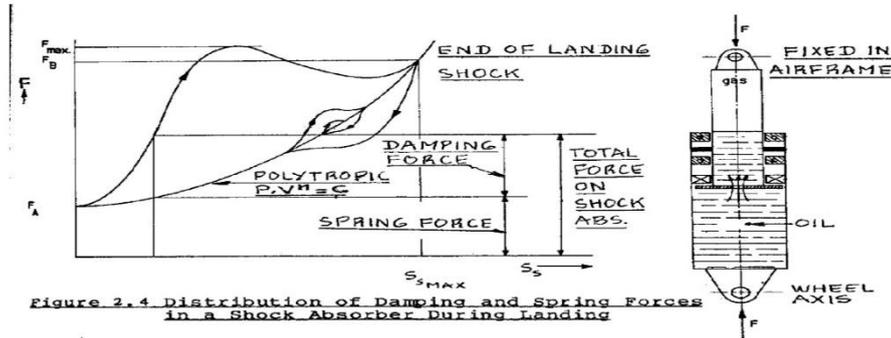


Figure 2.4 Distribution of Damping and Spring Forces in a Shock Absorber During Landing

Fonte: Roskam (2000)

Tabela 2 - Carregamento dinâmico máximo (carga limite)

$P_{ndynt} = WTO * [l_m + (a_x/g) * (h_{cg})] / (n_t * (l_m + l_n))$
WTO: Peso de Decolagem
ln: Distância do trem de pouso do nariz até o CG da aeronave
lm: Distância do trem de pouso principal até o CG da aeronave
ax/g: Desaceleração

Fonte: Adaptado de Roskam (2024)

O resultado da resolução da fórmula indicam o pico de contração máxima do amortecedor no momento do pouso da aeronave, esse resultado pode ser observado através da Tabela 3.

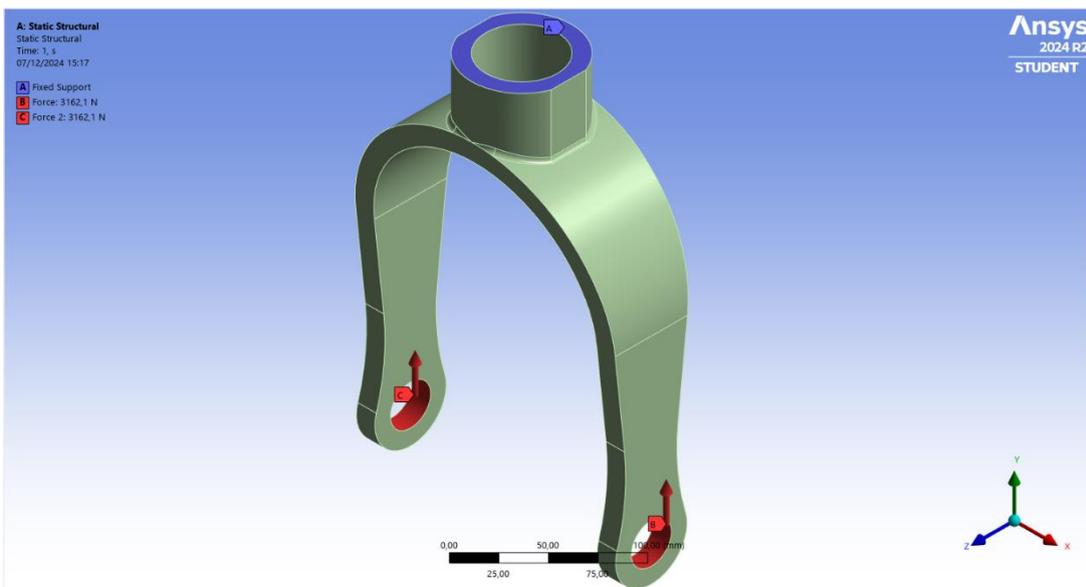
Tabela 3 - Resolução do Carregamento Dinâmico Máximo de Carga Limite

$P_{ndynt} = WTO * [l_m + (a_x/g) * (h_{cg})] / (n_t * (l_m + l_n))$
$P_{ndynt} = 2.558 * [25 + (0,35) * (23,62)] / (1 * (25 + 35))$
$P_{ndynt} = 1418,283 \text{ lb}$
$\text{Carga Total} = (1418,283 / 2,2) * 9,81 = 6.324,253 \text{ N}$
$\text{Carga em cada haste} = 3.162,127 \text{ N}$

Fonte: Adaptado de Roskam (2024)

A imagem abaixo (Figura 27) representa a distribuição das forças no garfo do trem de pouso de nariz, essa força está relacionada a carga limite que será distribuída entre os trens de pouso da aeronave Cessna 172S durante o pouso, totalizando 6.324,25 Newtons de força que serão distribuídos em cada haste da peça (3.162,13 Newtons), o suporte fixo representa a junção entre o garfo do trem de pouso e o amortecimento do conjunto do trem de pouso do nariz.

Figura 27 - Adição da força calculada (carga limite)

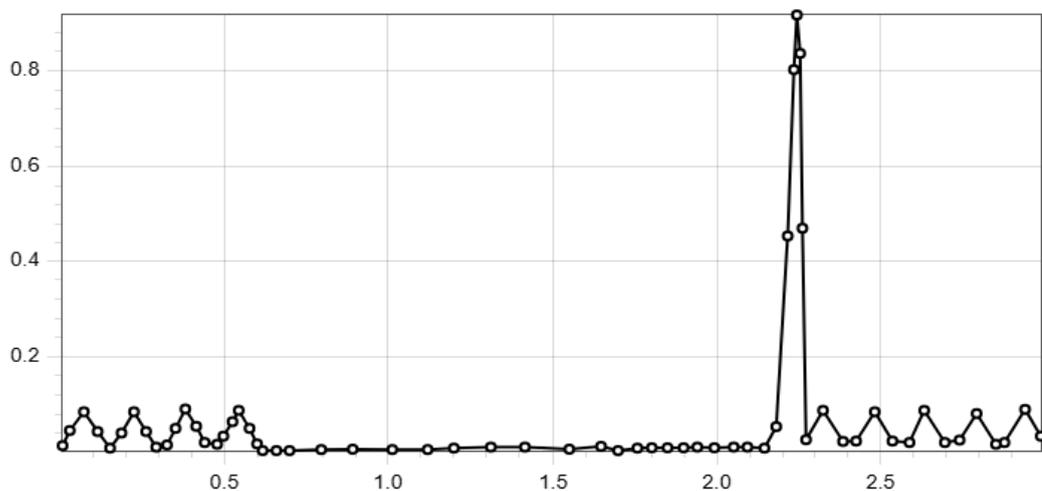


Fonte: Autores (2024)

Não é somente no pouso que o trem de pouso sofrerá a fadiga, no taxiamento, decolagem e voo de cruzeiro da aeronave, a fadiga também estará presente, ou seja, será necessário calcular a fadiga em toda a missão da aeronave, a fórmula de carregamento dinâmico máximo representa o pico de força aplicada no momento de pouso da aeronave.

Toda a missão da aeronave foi representada na imagem a seguir (Figura 28), tendo em vista de que o pico de força aplicada ocorreu durante o pouso da aeronave, as demais etapas da missão (taxiamento, decolagem e taxiamento), as forças aplicadas nessas etapas serão significativamente inferiores comparadas com as forças aplicadas no pouso, o gráfico a seguir representa uma missão completa da aeronave cessna 172S.

Figura 28 - Gráfico de espectro de carga com uma missão



Fonte: Autores (2024)

O gráfico acima (Figura 28) foi adicionado no *software* ANSYS para que o mesmo fosse multiplicado pela vida útil da aeronave (30 mil voos) e o fator de segurança exigido pelos órgãos reguladores (3), ou seja, o gráfico acima (Figura 28) foi multiplicado 90 mil vezes para que a análise de fadiga fosse realizada na peça como demonstrado na imagem a seguir.

3.2. CARGA ULTIMATE

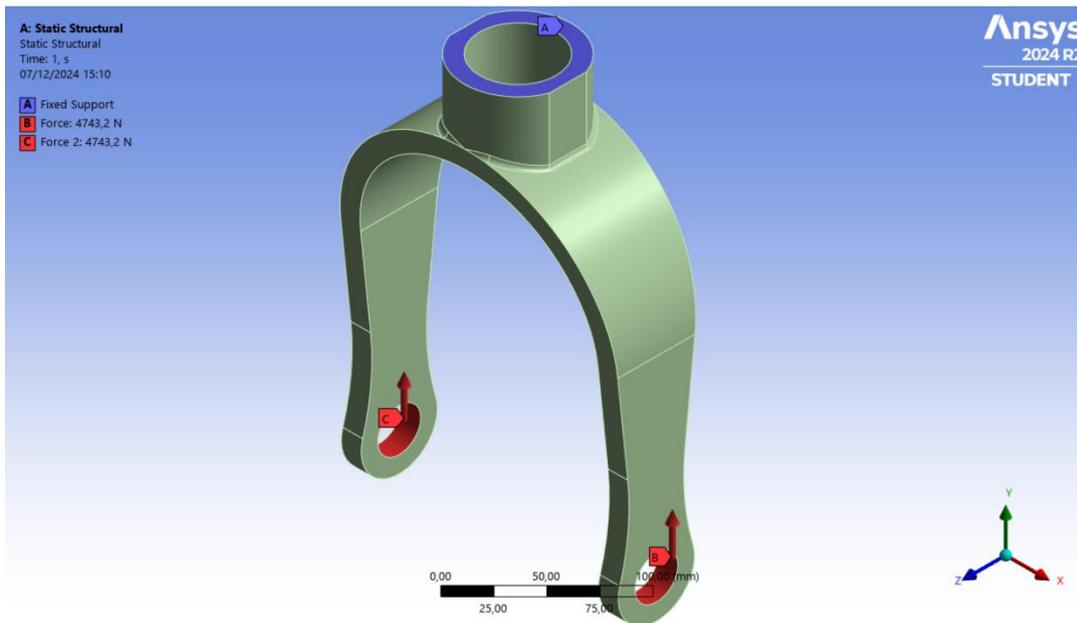
A carga *ultimate* representa a maior força aplicada no garfo do trem de pouso, ela é o equivalente a 150% da carga limite e é obtida através da mesma fórmula de carregamento dinâmico como demonstrado a seguir, na Figura 29 e Tabela 4.

Tabela 4 - Resolução da fórmula de carregamento dinâmico e aplicação da carga ultimate

$P_{ndynt} = WTO * [lm + (ax/g) * (hcg)] / (nt * (lm + ln))$
$P_{ndynt} = 2.558 * [25 + (0,35) * (23,62)] / (1 * (25 + 35))$
$P_{ndynt} = 1418,283 * 1,5 = 2.127,424 \text{ lb}$
$\text{Carga Total} = (2.127,424 / 2,2) * 9,81 = 9.486,379 \text{ N}$
$\text{Carga em cada haste} = 4.743,190 \text{ N}$

Fonte: Adaptado de Roskam (2024)

Figura 29 - Adição das força calculada (carga ultimate)



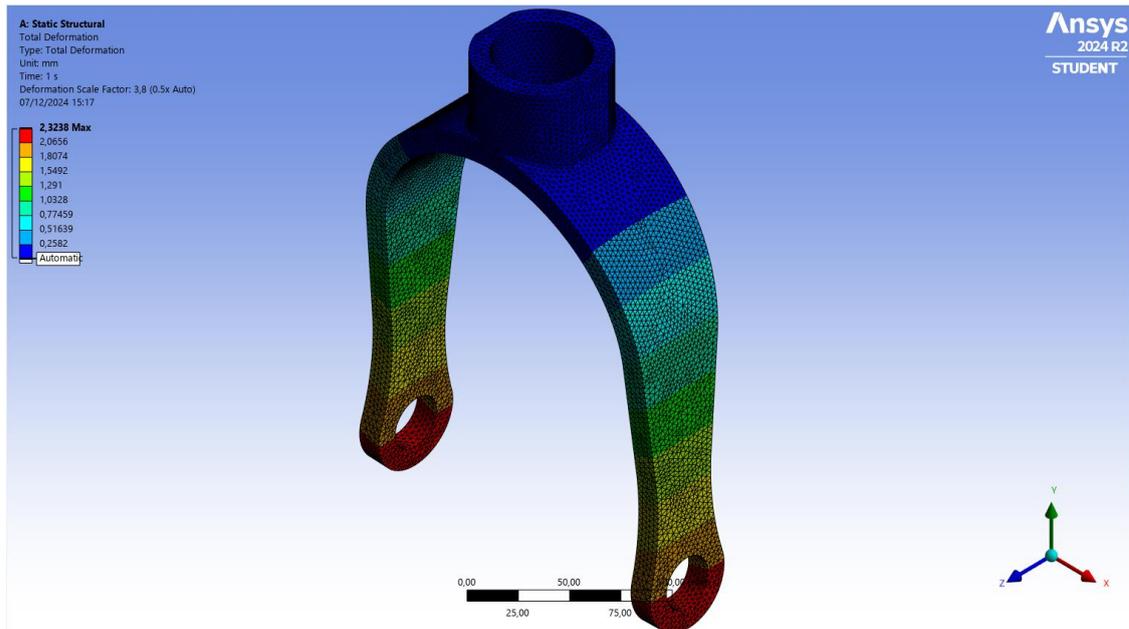
Fonte: Autores (2024)

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. CARGA LIMITE

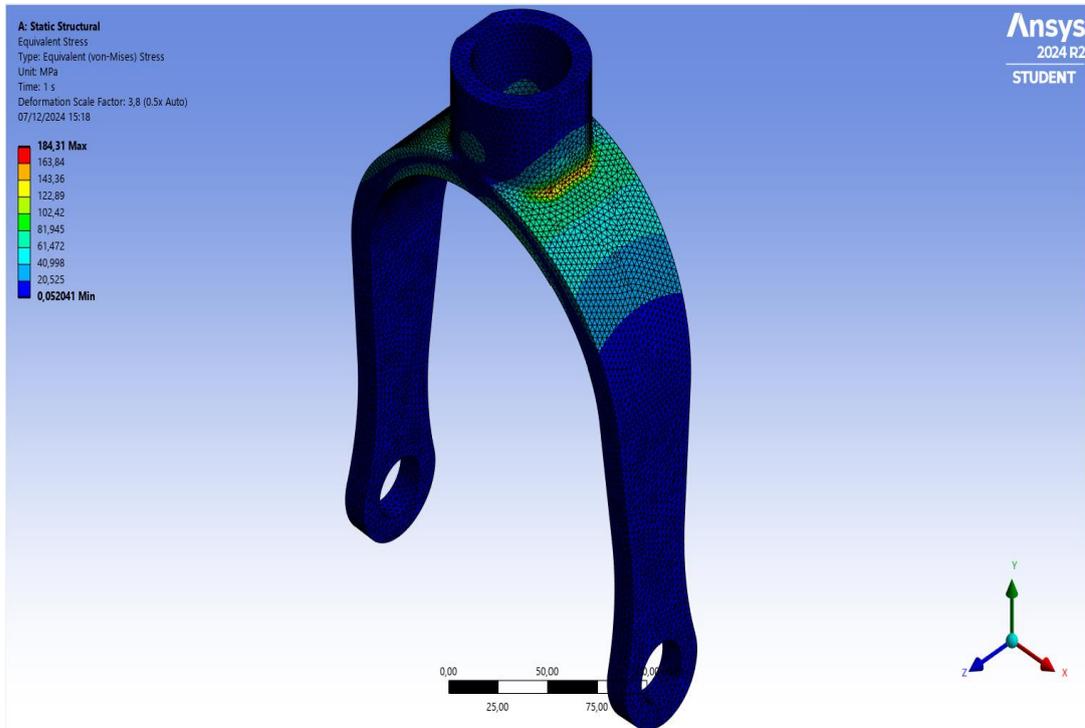
Após todas as etapas prévias da análise terem sido realizadas, a simulação foi iniciada e os resultados foram satisfatórios para a equipe, o componente em questão não sofreu uma deformação significativa para que a peça fosse impedida de ser fabricada devido ao não cumprimento das regulações impostas pelos órgão vigentes. As imagens a seguir (Figuras 30, 31 e 32) representam as forças aplicadas e deformações na peça.

Figura 30 - Deslocamento total



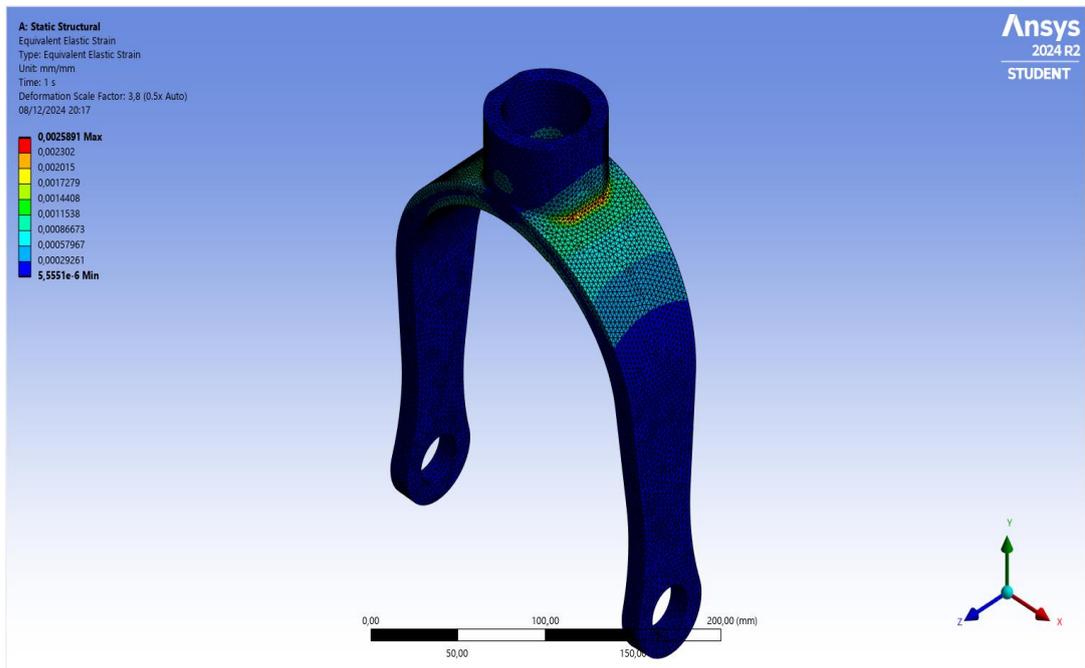
Fonte: Autores (2024)

Figura 31 - Tensão equivalente



Fonte: Autores (2024)

Figura 32 - Deformação elástica equivalente



Fonte: Autores (2024)

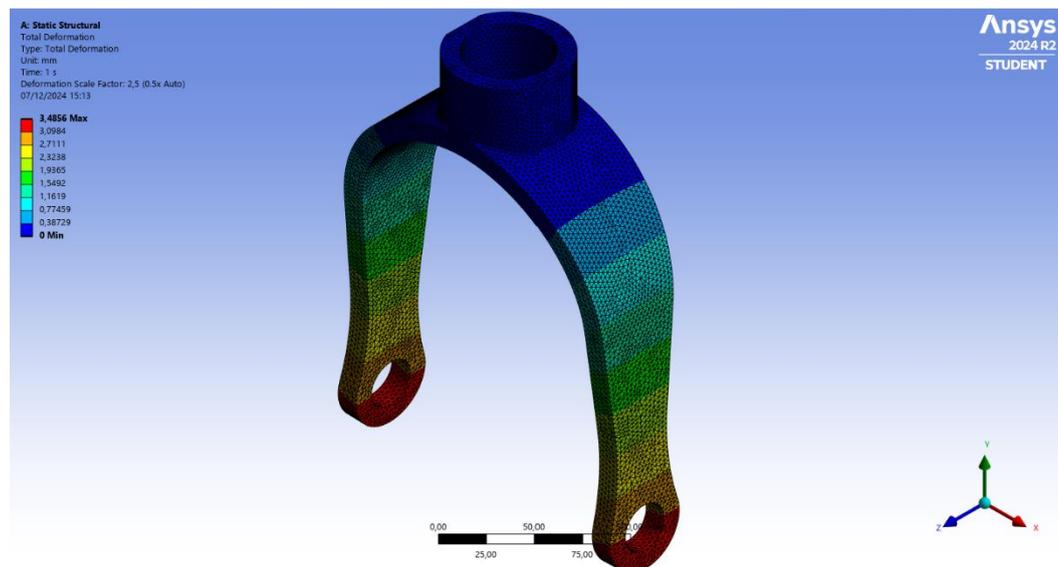
Os resultados de tensão obtidos pela análise estática com carga limite serão comparados com o limite de escoamento do alumínio (Figura 23) e a margem de segurança deve ser positiva conforme requisito 25,301 / 25,303 / 25,305.

4.2. CARGA ULTIMATE

A análise estática do garfo do trem de pouso do nariz utilizando a carga dinâmica ultimate serve como parâmetro de força máxima aplicada no garfo do trem de pouso do nariz, porém, não será utilizada na análise de fadiga por conta de que na vida útil da aeronave a carga limite será aplicada mais vezes do que a carga ultimate.

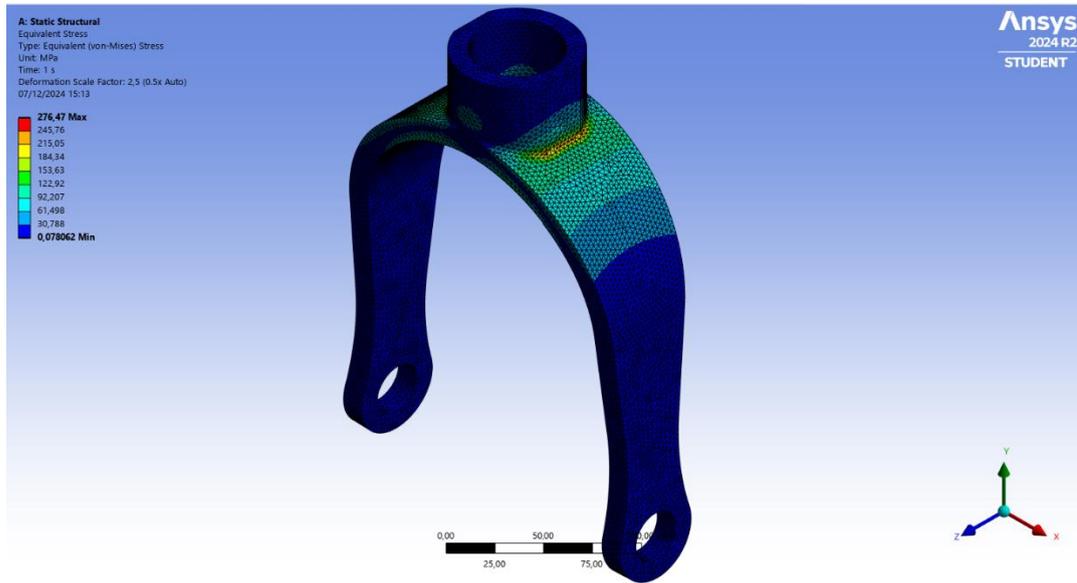
As imagens a seguir (Figuras 33,34 e Figura 35) representam a análise estática do garfo do trem de pouso do nariz utilizando a carga *ultimate*.

Figura 33 - Deslocamento total



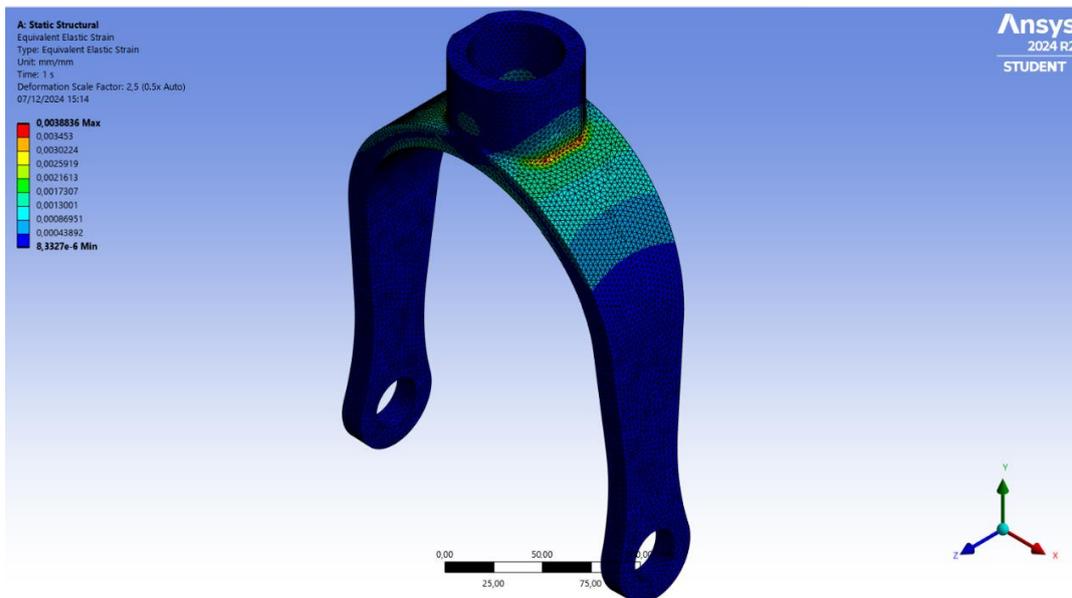
Fonte: Autores (2024)

Figura 34 - Tensão equivalente



Fonte: Autores (2024)

Figura 35 - Deformação elástica equivalente



Fonte: Autores (2024)

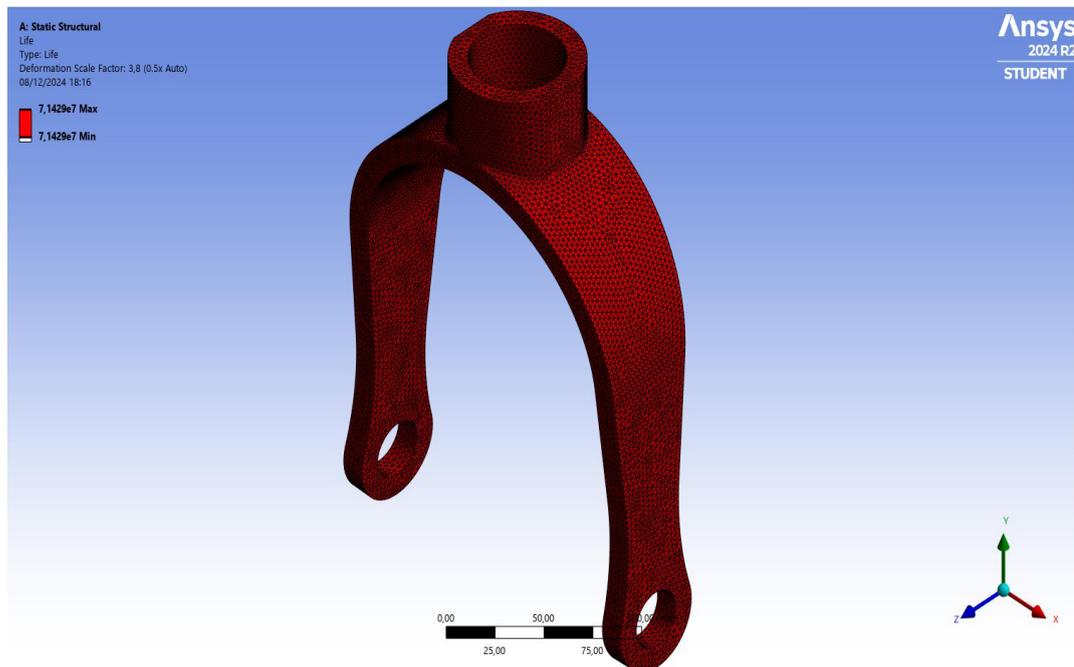
Os resultados de tensão obtidos pela análise estática com carga *ultimate* serão comparados com o limite de ruptura do alumínio (Figura 23) e a margem de segurança deve ser positiva.

4.3. ANÁLISE DE FADIGA

Por fim, as três imagens a seguir (Figuras 36, 37 e Figura 38) representam a vida útil do componente juntamente com o fator de segurança e dano causado ao garfo do trem de pouso, os cálculos realizados pelo ANSYS revelaram que a peça possui “vida infinita”, ou seja, o garfo do trem de pouso de nariz é tão superdimensionado que mesmo sendo utilizado durante 90 mil ciclos o componente nao sofreu deformações suficientes para que o *software* apontasse no gráfico de cores.

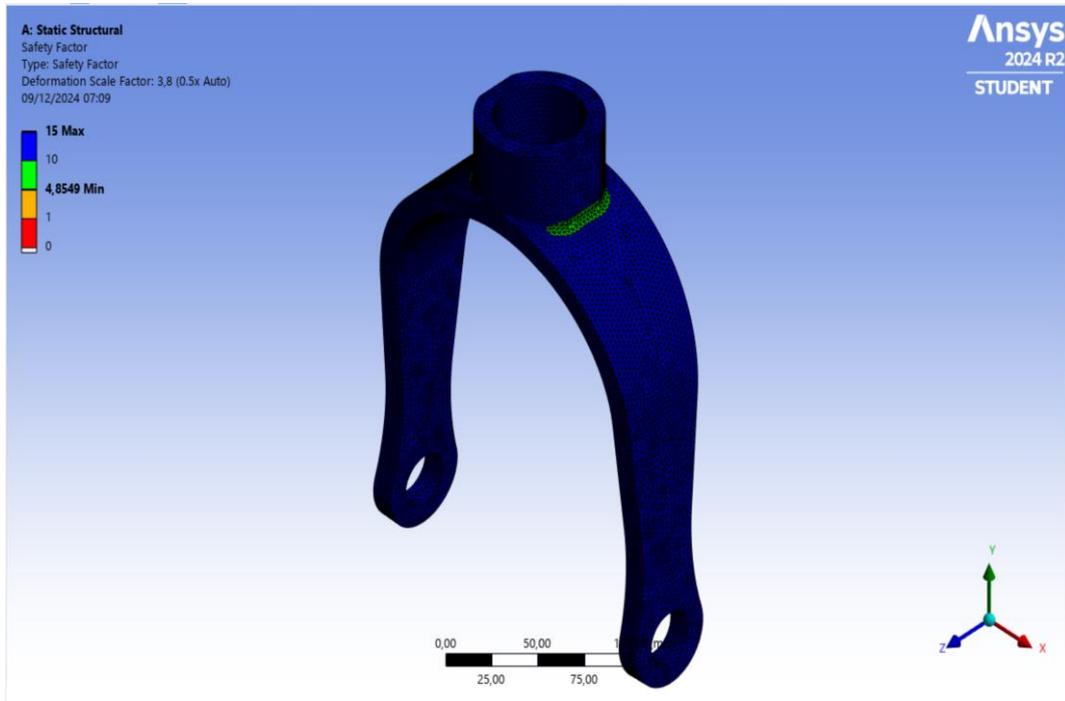
A análise de fadiga foi realizada utilizando apenas o cálculo de carga limite.

Figura 36 - Vida útil do componente (vida infinita)



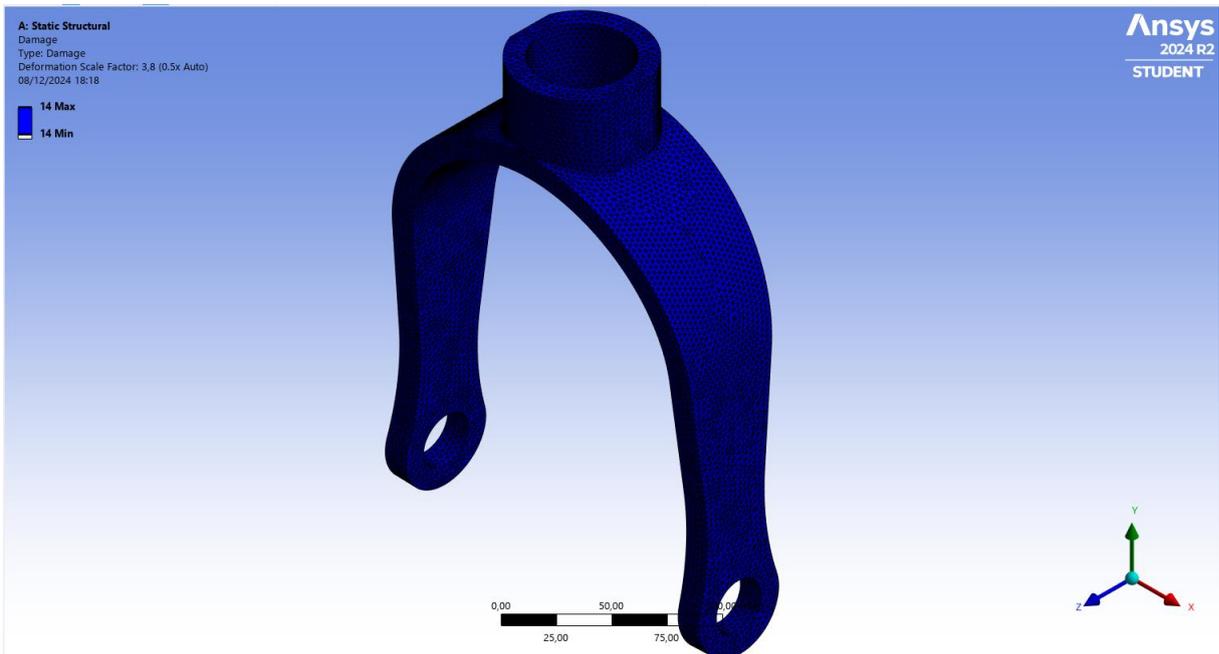
Fonte: Autores (2024)

Figura 37- Fator de segurança do componente



Fonte: Autores (2024)

Figura 38 - Dano causado ao garfo do trem de pouso de nariz



Fonte: Autores (2024)

5. CONCLUSÃO

O trem de pouso pertence ao grupo de componentes classificados como safe-life (vida segura), isso quer dizer que a estrutura do trem de pouso seja ele de nariz ou principal não poderá falhar durante a vida útil da aeronave. A estrutura possui um único caminho de carga e não poderá falhar durante as três vidas (vida útil mais o fator de segurança de três).

O uso de aços de liga, como SAE 4130 e SAE 4340, garante a resistência necessária para suportar as cargas durante pousos e taxiamentos. A aplicação de métodos numéricos, como de Elementos Finitos (MEF), possibilita a compreensão precisa do comportamento estrutural do trem de pouso, permitindo otimizações críticas no design e na performance dos componentes.

Softwares CAD e ANSYS desempenham papéis cruciais ao permitir a criação e modificação de projetos com alta precisão e simulações detalhadas. Essas ferramentas ajudam a prever o comportamento dos componentes sob condições extremas, identificando áreas críticas e melhorando a segurança e eficiência da aeronave.

A integração de materiais de alta qualidade, técnicas analíticas avançadas e ferramentas de simulação sofisticadas é essencial para garantir o desempenho seguro e eficiente do Cessna 172S. Essas práticas refletem o avanço contínuo na engenharia aeroespacial e o compromisso com a excelência na segurança e desempenho das aeronaves, assegurando que o Cessna 172S continue a ser um exemplo de inovação e confiabilidade na aviação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOS PORTE. (s.d.). **Aço SAE 4340. Aços Porte. 1998.** Disponível em: <https://www.acosporte.com.br/aco-sae-4340>. Acessado em: 25/10/2023.

ALTAIR (A). Disponível em: <<https://www.altair.com/hyperworks-applications/>>. Acessado em: 25/10/2023.

ALTAIR 13.0 (B). Disponível em: <https://blog.altair.co.kr/wp-content/uploads/2014/09/HyperWorks_13.0_ReleaseNotes-3.pdf>. Acessado em: 25/10/2023.

AMARAL, R.D.C.; FILHO, A.C.P. **A Evolução do CAD e sua Aplicação em Projetos de Engenharia.** Escola Politécnica, Universidade estadual do rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://docplayer.com.br/97842-A-evolucao-do-cad-e-sua-aplicacao-emproyetos-de-engenharia.html>. Acessado em: 25/10/2023

ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. 3. ed. CRC Press, 2017.** Acessado em: 15/09/2024.

ARAUJO, E. **Ensaio de fadiga: como prevenir e eliminar problemas de fadiga em campo. 2017.** Disponível em <<https://www.esss.co/blog/ensaio-de-fadiga-como-prevelnireeliminar-problemas-de-fadiga-em-campo/>>. Acessado em: 22/09/2023.

AUTOENTUSIASTAS. **Os 65 anos do avião mais produzido no mundo. 2020.** Disponível em: <https://autoentusiastas.com.br/2020/06/os-65-anos-do-aviao-mais-produzido-nomundo/> Acessado em: 23/10/2023.

AVINASH, K. **Introduction to Aerodynamics. New Delhi: McGraw-Hill, 2013.** Acessado em 14/07/2024.

AVIDORES, **Avião Cessna Aircraft T210N, 1980.** Disponível em <https://aviadores.com.br/aeronaves/aviao-cessna-aircraft-t210n-ano-1980/> Acessado em 10/10/2024.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Primeira edição – Faculdade de Engenharia de Porto, 2003. Disponível em:

http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/livro_mef_aa.pdf. Acessado em: 25/10/2023.

BIANCH, **Como Funciona o Trem de Pouso**. Disponível em: <https://blog.bianch.com.br/como-funciona-um-trem-de-pouso/> Acessado em: 25/10/2023.

BRASIL. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil - RBAC nº 23: Requisitos de Aeronavegabilidade para Certificação de Aeronaves da Categoria Normal, Utilidade, Acrobática e Transporte Regional**. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), 2017. Acessado em 23/10/2023.

BRASIL MECÂNICO, **passo-passo-da-substituicao-de-freios-tambor, 2016**. Disponível em: <https://brasilmecanico.com.br/2016/10/passo-passo-da-substituicao-de-freios-tambor/> Acessado em: 14/10/2024

BROEK, D. **The Practical Use of Fracture Mechanics. 1. ed. Springer, 1989**. Acessado em: 24/09/2024.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. Acessado em: 30/09/2024.

CENIPA. **RELATÓRIO FINAL SIMPLIFICADO A 101/CENIPA/2018**. Disponível em: <https://sistema.cenipa.fab.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/relatorios.php>. Acessado em: 25/10/2023.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos. 7. ed. São Paulo: ABM, 2000**. Acessado em: 27/09/2024.

COLD JET. **Trem de Pouso. Cold Jet Blog. 2019**. Disponível em: <https://blog-ptbr.coldjet.com/trem-de-pouso>. Acessado: 25/10/2023

DAVIS, J. R. **Aluminum and Aluminum Alloys. Materials Park: ASM International, 1999.** Acessado em 28/11/2024

DIMENSIONS. **Cessna 172 Skyhawk Aircraft.** Disponível em: Cessna 172 Skyhawk Aircraft Dimensions & Drawings | Dimensions.com. Acessado em 06/11/2023.

DOWLING, N. E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue.* 4. ed. Boston: Pearson, 2012. Acessado em: 28/09/2024.

FERNANDES, F. E., METLER, R. A. **Análise estrutural do trem de pouso do nariz da aeronave Embraer Tucano, simulações virtuais utilizando software dedicado a cálculos em elementos finitos.** Trabalho de Graduação – Curso de Tecnologia em Estruturas Aeronáuticas. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal, 2021.

GAIKWAD, A. V.; SAMBHE, R. U.; GHAWADE, P. S. **Modeling and Analysis of Aircraft Landing Gear: Experimental Approach,** 2013.

HERNANDES, F.; NARESSI, J. **Aeronavegabilidade Relacionados à Fadiga Estrutural em Aeronaves,** SIPAER Revista Científica de Segurança de Voo, v. 8, n. 1, janeiro - abril, 2017.

JM, EDUARDO. **Parte 1 do TCC.** Disponível em: <https://eduardojm.github.io/tcc/part1.html> Acessado em: 26/10/2024.

JONES, D. A. **Principles and Prevention of Corrosion. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 1996.** Acessado em: 28/09/2024.

NORTON, Robert L. **Análise da Confiabilidade: uma visão geral para engenharia mecânica. São Paulo: Bookman, 2000.** Acessado em: 27/09/2024.

RAYMER, D. P. **Aircraft Design: A Conceptual Approach.** Terceira edição. AIAA –American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999

RICE, R. C. **Fatigue design handbook**. Terceira edição. Society of Automotive Engineers Inc, 1988. Acessado em: 07/10/2023.

RIZZO, J. **Conhecimentos Técnicos sobre PPA (Plano de Pouso de Aeronaves)**.

Disponível em:

<https://www.aerocurso.com/arquivos/ppa/ppabconhecimentostecnicos-02-01-rizzo.pdf>. Acessado em 22/10/2023.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica – Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign**. Volume Único. 1. Ed. rev. – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2011. Acessado em: 13/10/2023.

SADRAEY, M. **Aircraft design: A systems engineering approach**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2002. 808 p. Disponível em: [http://faculty.dwc.edu/sadraey/Chapter 6. Tail Design.pdf](http://faculty.dwc.edu/sadraey/Chapter%206.%20Tail%20Design.pdf). Acessado em: 25/10/2023.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2009. Acessado em: 26/09/2024.

SUTHERLAND, R. J. **Wind Tunnel Testing Techniques**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. Acessado em: 09/09/2024.

TURNERBLOG. **Tudo sobre o Cessna 172 Skyhawk**. 2022 Disponível em <https://turnertankers.org/pt/tudo-sobre-o-cessna-172-skyhawk/> Acessado em: 25/09/2023.

RAZOR, J. **Advances in Aerospace Engineering: Design and Simulation**. London: Elsevier, 2022. Acessado em: 22/09/2023