



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

ANÁLISE ESTRUTURAL DO TREM DE POUSO DE UMA AERONAVE SAE AERODESIGN USANDO MEF E FMEA

Filipe Erick Teixeira Silva, d201611082@uftm.edu.br¹
Luiz Eduardo Silva Ribeiro, d201610596@uftm.edu.br¹
Tobias Anderson Guimarães, tobias.guimaraes@uftm.edu.br¹
Ricardo Humberto de Oliveira Filho, ricardo.humberto@ufu.br²

¹Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Av. Frei Paulino, nº 30 – Bairro Abadia – Uberaba – MG

²Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, nº 2121 - Bairro Santa Mônica - Uberlândia - MG

Resumo. O trem de pouso é um componente essencial para aeronaves, suportando os carregamentos verificados na estrutura durante o pouso. Na competição SAE BRASIL AeroDesign, uma falha nesse componente gera penalidades que prejudicam a ambição da equipe na disputa. Portanto, esse trabalho emprega o Método dos Elementos Finitos (MEF) e FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falha) para verificação da integridade estrutural do trem de pouso de uma aeronave de pequeno porte não tripulada para competição SAE BRASIL AeroDesign. A metodologia aplicada realiza a verificação das tensões e deslocamentos do eixo e rodas para a condição de pouso considerada mais crítica para a aeronave. Para as análises, foi utilizado o software SolidWorks® para a modelagem geométrica dos componentes do trem de pouso e o software ANSYS® na simulação por elementos finitos dos subsistemas de trem de pouso após a montagem. A aplicação do MEF combinada com FMEA provou ser uma metodologia efetiva na análise da integridade estrutural do trem de pouso, considerando os diferentes tipos de materiais dos componentes e condições de contato estabelecidos na montagem. Foi verificado que os componentes do sistema estão dimensionados, e além disso, que o eixo do trem de pouso é o componente mais crítico do sistema, necessitando de maior atenção durante as etapas de projeto e construção da aeronave.

Palavras chave: análise estrutural; análise de modo e efeito de falha; método dos elementos finitos; trem de pouso.

Abstract. The landing gear is an essential component for aircraft, supporting the loads on the structure during landing. In the SAE BRASIL AeroDesign competition, a failure in this component generates penalties that harm the team's ambition in the competition. Therefore, this work uses the Finite Element Method (FEM) and FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) to verify the structural integrity of the landing gear of a small unmanned aircraft for the SAE BRASIL AeroDesign competition. The methodology applied checks the tensions and displacements of the axle and wheels for the landing condition considered most critical for the aircraft. For the analyses, the SolidWorks® software was used for the geometric modeling of the landing gear components and the ANSYS® software was used for the finite element simulation of the landing gear subsystems after assembly. The application of FEM combined with FMEA proved to be an effective methodology in analyzing the structural integrity of the landing gear, considering the different types of component materials and contact conditions established in the assembly. It was verified that the system components are sized, and furthermore, that the landing gear axis is the most critical component of the system, requiring greater attention during the aircraft design and construction stages.

Keywords: structural analysis; failure mode and effect analysis; finite element method; landing gear

1. INTRODUÇÃO

O trem de pouso é um componente essencial para aeronaves e tem função primordial nas etapas de aterrissagem e manobras em solo. Seu mau funcionamento pode causar transtornos durante as etapas mais críticas de um voo, que são a decolagem e a aterrissagem. Desse modo, as etapas de projeto e construção devem ser elaboradas com bastante atenção, levando em consideração todas as cargas atuantes nesse sistema para o seu dimensionamento correto, garantindo a eficiência estrutural, a segurança dos passageiros e tripulação e sempre visando a economia de peso e, conseqüentemente, de recursos.

A competição SAE BRASIL AeroDesign é um desafio lançado aos estudantes de Engenharia que tem como principal objetivo propiciar a difusão e o intercâmbio de técnicas e conhecimentos de Engenharia Aeronáutica, através de aplicações práticas e da competição entre equipes (SAE Brasil, 2022). Ainda de acordo com a SAE Brasil (2022), essa competição é composta por três classes: Regular, Advanced e Micro. As equipes são avaliadas e classificadas em duas etapas:

Competição de Projeto, onde os projetos das aeronaves são avaliados, e Competição de Voo, onde o desempenho das aeronaves é avaliado por meio de baterias de voo.

A equipe Triângulo Aéreo AeroDesign compete na categoria Regular da competição, onde o trem de pouso é um elemento muito importante, visto que deve suportar os esforços resultantes nos momentos de pouso e decolagem da aeronave, sendo crítico para o momento da aterrissagem, que é o momento em que ocorrem os maiores carregamentos na estrutura. Sabendo que o regulamento da competição prevê a desqualificação da bateria voada caso algum componente do avião apresente avarias após o voo, é de extrema importância assegurar que o sistema de aterrissagem cumpra seu papel e suporte todos os esforços aplicados durante esta etapa.

Nesse trabalho será desenvolvido uma metodologia de verificação da integridade estrutural dos componentes do trem de pouso de uma aeronave para competição SAE AeroDesign empregando o Método dos Elementos Finitos (MEF) combinada com Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA). Os subsistemas a serem dimensionados são: eixo e rodas. Abeling (2016) realizou o dimensionamento dos subsistemas do trem de pouso de uma aeronave para competição SAE AeroDesign utilizando uma abordagem analítica para previsão das tensões e flecha máxima usando as equações de Resistência dos Materiais. Neste trabalho, será aplicada uma modelagem computacional, tanto para geração da geometria dos subsistemas, como para a previsão das tensões e deslocamentos por meio do MEF. Devido aos diferentes tipos de materiais, condições de contato devido a montagem e a complexidade geométrica dos componentes, fica praticamente impossível prever o estado de tensões e deslocamentos usando os métodos analíticos convencionais na análise estrutural do trem de pouso (BUDYNAS e NISBETT, 2011). Por isso, foi empregado nesse trabalho o MEF em conjunto com FMEA para análise estrutural do trem de pouso na condição crítica de carregamento, quando ocorre o pouso em uma roda.

2. TREM DE POUSO DE UMA AERONAVE AERODESIGN

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), 2022, o trem de pouso é uma infraestrutura que suporta o peso de uma aeronave quando em contato com o solo ou com a água, e em geral contém um mecanismo para a redução do choque de pouso. O termo abarca também as rodas principais de pouso, a roda de cauda (bequilha), o patim da cauda, dentre outros.

A Figura 1 ilustra as vistas frontal e lateral direita da aeronave de competição SAE AeroDesign da equipe Triângulo Aéreo, onde é possível observar o trem de pouso principal na parte central da aeronave e a roda da bequilha na parte frontal.

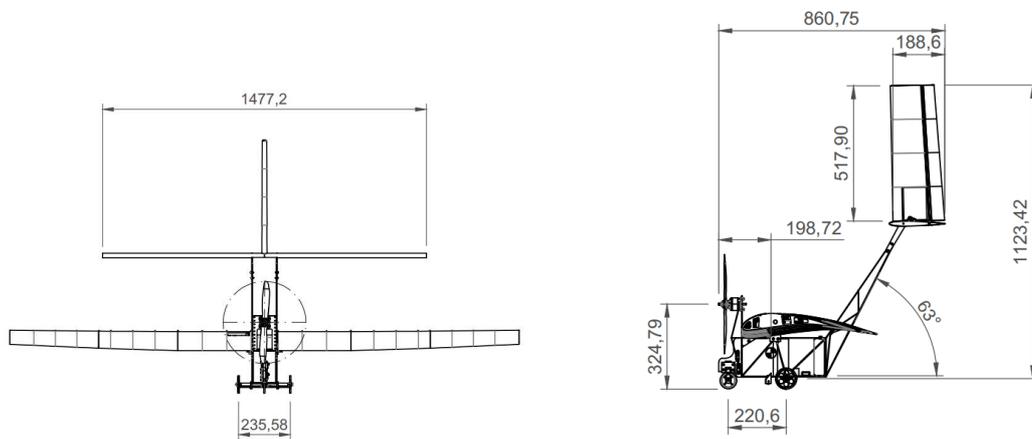


Figura 1 – Vistas frontal e lateral da aeronave SAE AeroDesign da equipe Triângulo Aéreo (Equipe Triângulo Aéreo AeroDesign, 2021)

A Figura 2 mostra os componentes do trem de pouso principal por meio da vista explodida. O parafuso allen sextavado interno, representado pelo número 1, é o responsável por fixar os componentes do trem de pouso. Os rolamentos são responsáveis por permitir a rotação das rodas que movimentam o avião, e estão representados pelo número 2. O número 3 representa as rodas de nylon, que têm a função de movimentar o avião auxiliando nas manobras em solo e corrida de decolagem. Os espaçadores são um componente auxiliar que ajusta o diâmetro do eixo ao diâmetro do rolamento escolhido, número 4 na figura. A bucha é responsável por apoiar o eixo e o espaçador, e é o componente número 5 na figura. O eixo, representado pelo algarismo 6, é a estrutura responsável por suportar o peso do avião e os esforços verificados durante a decolagem e o pouso da aeronave, sendo crucial para um bom desempenho na competição.

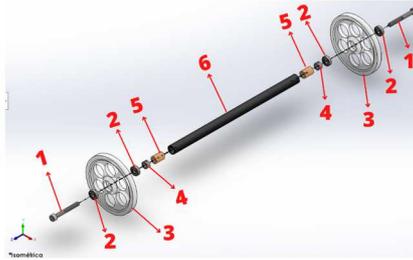


Figura 2 – Vista explodida do trem de pouso principal (Dos autores, 2024)

Nesse trabalho, serão analisados os esforços presentes no trem de pouso principal, com foco na roda de Nylon e no eixo de fibra de carbono, já que esses são os componentes analisados pela direção de prova na inspeção pós voo e devem permanecer intactos durante todas as baterias da competição.

3. CÁLCULO DOS CARREGAMENTOS E MODELAGEM DOS SUBSISTEMAS DO TREM DE POUSO POR ELEMENTOS FINITOS

3.1. Cálculo dos carregamentos durante o pouso da aeronave

Para o cálculo dos carregamentos durante o pouso da aeronave, foram considerados os dados referentes à aeronave modelada no ano de 2021 pela equipe Triângulo Aéreo AeroDesign. A carga máxima de decolagem (*Maximum Take-Off Weight - MTOW*) é a massa do avião vazio mais a massa da carga transportada, e foi obtida por meio de um Algoritmo Genético da própria equipe, em MATLAB®. O fator de carga (F_c) foi escolhido com base na norma FAR-PART 23 (2002). Os parâmetros usados no cálculo dos carregamentos estão descritos na Tab. 1.

Tabela 1 – Parâmetros da Aeronave de 2021 (dos autores, 2024)

Parâmetros			
Variável	Incógnita	Valor	Unidade
Aceleração da gravidade	g	9,80665	m/s^2
Carga máxima de decolagem	$MTOW$	13,2764	Kg
Fator de carga	F_c	3	-

Com esses dados é possível definir a força atuante no trem de pouso da aeronave ($F_{atuante}$) de acordo com a Eq. (1).

$$F_{atuante} = g * MTOW * F_c \quad (1)$$

Para determinar a condição crítica de pouso, ou seja, a condição em que os componentes do sistema de aterrissagem sofrerão maior carga, foram consideradas 3 condições de pouso: pouso em uma roda, quando apenas uma das rodas do trem de pouso principal toca o solo no momento do pouso; pouso em duas rodas, quando as duas rodas do trem de pouso principal tocam o solo ao mesmo momento, dividindo o carregamento resultante igualmente entre as duas; e pouso em três rodas, quando ambas as rodas do trem de pouso principal e a roda da bequilha tocam o solo ao mesmo tempo, dividindo assim o carregamento resultante do pouso entre os 3 componentes.

Para o pouso em uma roda, segundo a norma FAR-PART 23 (2002), calcula-se a força vertical e horizontal para essa condição de pouso, aplicadas em uma das rodas do trem de pouso principal, e definida pelas Eqs. (2) e (3).

$$F_{vp1} = F_{atuante} \quad (2)$$

$$F_{hp1} = 0,4 * F_{atuante} \quad (3)$$

onde F_{vp1} representa a força vertical para o pouso em uma roda em [N] e F_{hp1} a força horizontal para o pouso em uma roda em [N].

Para o pouso em duas rodas, segundo a norma FAR-PART 23 (2002), a força vertical, (F_{vp2}), em [N] e a força horizontal (F_{hp2}) em [N], aplicadas nas duas rodas do trem de pouso principal, são dadas pelas Eqs. (4) e (5).

$$F_{vp2} = \frac{1}{2} * F_{atuante} \quad (4)$$

$$F_{hp2} = 0,4 * F_{vp2} \quad (5)$$

Já para o pouso em três rodas, tanto o trem de pouso traseiro (principal) como o dianteiro são carregados durante a aterrissagem. Assim, os carregamentos devido à aterrissagem são distribuídos para a roda da bequilha e para o trem de pouso principal. Segundo a norma FAR-PART 23 (2002), utiliza-se as Eqs. (6) e (7) para a determinação dos carregamentos no trem de pouso.

$$F_{vp3} = \frac{0,85 * F_{atuante}}{2} \quad (6)$$

$$F_{hp3} = 0,4 * F_{vp3} \quad (7)$$

onde F_{vp3} e F_{hp3} são as forças vertical e horizontal para o trem pouso em [N]. As forças vertical e horizontal, F_{vbp3} e F_{hbp3} , atuantes na bequilha, são definidas nas Eqs. (8) e (9).

$$F_{vbp3} = 0,15 * F_{atuante} \quad (8)$$

$$F_{hbp3} = 0,4 * F_{vbp3} \quad (9)$$

Após o cálculo dos carregamentos no trem de pouso e bequilha definidos pelas Equações (1) a (9), foi feita a comparação da magnitude das forças com o objetivo de analisar a situação mais crítica. A situação mais desfavorável foi utilizada na análise de elementos finitos do trem de pouso com as cargas e condições de contorno simulando a aterrissagem da aeronave.

3.2. Modelagem por elementos finitos e análise de tensões

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma aproximação numérica que permite a resolução de equações diferenciais parciais de modo aproximado, ao dividir o corpo em elementos finitos, muitas vezes chamados apenas de elementos, conectados por nós, e obter uma solução aproximada com a construção de uma malha de elementos finitos (BELYTSCHKO e FISH, 2007).

A aplicação do MEF na modelagem dos componentes de trem de pouso se justifica devido aos diferentes materiais, condições de contato e complexidade geométrica do modelo.

Devido aos diferentes tipos de materiais utilizados na construção do trem de pouso, torna-se necessário a aplicação de Critérios de Resistência diferentes dependendo da ductilidade ou fragilidade. Por exemplo, no caso da roda de nylon, que é um material dúctil, após a análise de elementos finitos, deve-se verificar a tensão equivalente de Von Mises dada pela Eq. (10) (BUDYNAS E NISBETT, 2011).

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3} \quad (10)$$

onde σ_1 , σ_2 e σ_3 representam as tensões principais. Assim, para verificar se a roda está dimensionada, a tensão equivalente de Von Mises deverá ser menor que a tensão de projeto dada pela relação entre o limite de escoamento do material e o coeficiente de segurança adotado no projeto, conforme a Eq. (11) (BUDYNAS E NISBETT, 2011).

$$\sigma_r = \frac{\sigma_e}{CS} \quad (11)$$

onde σ_e representa o limite de escoamento do material, σ_r a tensão de projeto e CS o fator de segurança.

No caso do eixo em fibra de carbono, por apresentar características de um material frágil, existem Critérios de Resistência específicos levando em conta a fragilidade e a ortotropia (BUDYNAS E NISBETT, 2011). Entretanto, neste trabalho, será empregado um Critério de Resistência comum para os materiais frágeis, o Critério de Coulomb-Mohr, disponível no software ANSYS® de elementos finitos. A ideia deste critério é comparar a magnitude da máxima tensão principal de tração ou compressão, obtida na análise de elementos finitos com a tensão de projeto (BUDYNAS E NISBETT, 2011):

$$\sigma_{eq} = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (12)$$

onde σ_{eq} representa a tensão equivalente do Critério de Coulomb-Mohr.

Assim, caso a magnitude da tensão equivalente ultrapasse a tensão de projeto, definida pela Equação (11), significa que o eixo constituído de material frágil não estará dimensionado.

Neste trabalho não serão consideradas as tensões de contato provocadas pela interferência devido a montagem, em virtude da dificuldade em mensurar essas tensões de contato. Assim, serão consideradas somente as tensões provocadas pelos carregamentos no trem de pouso durante a aterrissagem da aeronave.

4. ANÁLISE DE MODO DE EFEITO DE FALHA

A ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), chamada no Brasil de Análise de Modo e Efeito de Falha, busca evitar que ocorram problemas no projeto de um produto ou processo, ao analisar falhas potenciais e propor ações de melhoria (LOBO, 2020). Essa metodologia analisa de forma detalhada todos os modos de falha de um sistema, identificando e investigando os efeitos causados por essas falhas, diminuindo a probabilidade de ocorrência delas e aumentando a confiabilidade do sistema. Após a análise de cada modo e efeito de falha, e encontrada a causa dela, é analisado individualmente por meio de índices o risco gerado pela falha, adotando-se medidas posteriores para que os riscos sejam diminuídos e a confiabilidade do processo seja aumentada (SILVEIRA et al., 2019).

A FMEA de projeto tem como foco minimizar falhas nos componentes e subsistemas de um produto, investigando erros passíveis de acontecerem nas especificações do projeto, antes da fabricação. Ao analisar as possíveis falhas, são privilegiadas ações corretivas e de melhorias no projeto, e identificados os pontos mais críticos na elaboração do produto, resultando no aumento da confiabilidade e da qualidade do projeto, e na diminuição de gastos, maximizando a eficiência.

Através da análise estrutural do eixo de fibra de carbono do trem de pouso principal da aeronave da equipe Triângulo Aéreo AeroDesign, serão conhecidos os pontos mais solicitados do eixo durante a condição crítica de pouso. Conhecendo esses pontos, que concentram a maior possibilidade de falha durante a operação do trem de pouso, será aplicado um FMEA na forma de questionário aos responsáveis pela construção da aeronave e pela gestão da equipe. Esse FMEA será baseado na ferramenta 5W2H e tem o objetivo de prever e solucionar os possíveis erros no projeto e construção do componente que possam vir a ocasionar a falha do trem de pouso durante a competição.

A ferramenta 5W2H é bastante utilizada no meio empresarial no planejamento estratégico e operacional das companhias. Ela consiste em um conjunto de questões objetivas que visam estabelecer atividades, prazos e atribuições. O nome da ferramenta vem do inglês e representa o conjunto de perguntas que são feitas durante o processo a fim de determinar todas as atividades, prazos e atribuições: *What* (o que será feito?); *Why* (por que será feito?); *Where* (onde será feito?); *When* (quando será feito?); *Who* (por quem será feito?); *How* (como será feito?); *How Much* (quanto deve-se investir?).

Além disso, o Número de Prioridade de Risco (NPR) será calculado multiplicando os três índices, frequência, gravidade e detecção, que serão definidos pela equipe que participará do FMEA. Os índices são avaliados de 1 a 10, sendo que quanto maior a frequência maior a probabilidade de a falha acontecer, quanto maior a gravidade mais severo é o efeito da falha no produto analisado, e quanto maior o índice de detecção mais difícil é a detecção da falha. Portanto, quanto maior o NPR calculado, mais crítica é a falha para o sistema. Os critérios utilizados para a definição desses índices serão adaptados de Toledo e Amaral (2006), considerando a realidade e especificidades do projeto na competição e estão descritos nas Tabs. 2a, 2b e 2c.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, o modelo CAD do sistema de aterrissagem vigente foi desenhado com o auxílio do *software* SolidWorks®. Com base nesse modelo foram feitas as análises estruturais, objetivando identificar os pontos mais críticos do trem de pouso onde as tensões são mais acentuadas. Com isso, através do *software* ANSYS®, será possível aplicar os Critérios de Resistência aos resultados da simulação por elementos finitos na análise das tensões na roda (Von Mises) e no eixo (Coulomb-Mohr).

Com esses dados, será possível identificar os pontos mais críticos da construção do produto. Portanto, o FMEA será aplicado junto à equipe responsável pela estruturação, para identificar e prevenir possíveis falhas, erros de elaboração e pontuar com detalhes as brechas existentes durante todo o processo de projeto, desenvolvimento e construção desse importante componente da aeronave.

Para o cálculo das cargas atuantes no trem de pouso, foi implementado um programa em MATLAB® utilizando a formulação descrita em 3.1. A Figura 3 ilustra o trem de pouso nas 3 situações de aterrissagem com 1, 2 e 3 rodas.

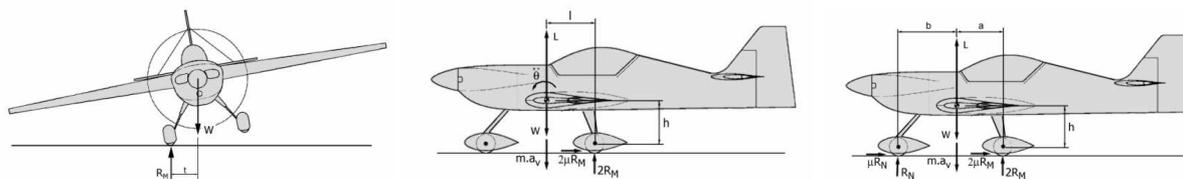


Figura 3 – Aterrissagem em uma, duas e três rodas, respectivamente (ISCOLD, 2002).

Tabela 2 – a) Critérios de Frequência

b) Critérios de Gravidade

Probabilidade de Falha	Critérios: Ocorrência de Causa - DFMEA (Vida útil do Projeto / confiabilidade do item/aeronave)	Critérios: Ocorrência de Causa - DFMEA (Incidentes por itens/aeronaves)	Classificação	Efeito	Critérios: Severidade do Efeito no Produto (Efeito no Cliente)	Classificação
Muito Alta	Nova tecnologia/novo projeto, sem histórico.	≥ 100 por mil ≥ 1 em 10	10	Falha em atender a requisitos de segurança e/ou regulatórios	Modo de falha potencial afeta a operação segura da aeronave e/ou envolve não conformidade com regulamentação da competição, sem prévio aviso.	10
Alta	A falha é inevitável, com novo projeto/nova aplicação, ou alteração no ciclo de trabalho/condições operacionais.	50 por mil 1 em 20	9		Modo de falha potencial afeta a operação segura da aeronave e/ou envolve não conformidade com regulamentação da competição, com prévio aviso.	9
	A falha é provável, com novo projeto/nova aplicação, ou alteração no ciclo de trabalho/condições operacionais.	20 por mil 1 em 50	8	Perda ou degradação da função primária	Perda da função primária (aeronave inoperável, não afeta a operação segura da aeronave).	8
	A falha é incerta, com novo projeto/nova aplicação, ou alteração no ciclo de trabalho/condições operacionais.	10 por mil 1 em 100	7		Degradação da função primária (aeronave operável, mas com um nível reduzido de desempenho).	7
Moderada	Falhas frequentes associadas a projetos similares, ou em simulação e testes de projeto.	2 por mil 1 em 500	6	Perda ou degradação da função secundária	Perda da função secundária (aeronave operável, mas as funções de conforto/conveniência estão inoperáveis).	6
	Falhas ocasionais associadas a projetos similares, ou em simulação e testes de projeto.	0,5 por mil 1 em 2000	5		Degradação da função secundária (aeronave operável, mas as funções de conforto/conveniência apresentam um nível reduzido de desempenho).	5
	Falhas isoladas, associadas a projeto similar, ou em simulação e testes de projeto.	0,1 por mil 1 em 10000	4	Incômodo	Aparência ou ruído audível, aeronave operável, item não conforme e percebido pela maioria dos espectadores (>75%).	4
Baixa	Somente falhas isoladas, associadas a projeto praticamente idêntico, ou em simulação e testes de projeto.	0,01 por mil 1 em 100000	3		Aparência ou ruído audível, aeronave operável, item não conforme e percebido por muitos espectadores (>55%).	3
	Falhas não observadas, associadas a projeto praticamente idêntico, ou em simulação e testes de projeto.	$\leq 0,001$ por mil 1 em 1.000.000	2		Aparência ou ruído audível, aeronave operável, item não conforme e percebido por espectadores observadores (<25%).	2
Muito Baixa	A falha é eliminada por controle preventivo.	A falha é eliminada por controle preventivo.	1	Nenhum efeito	Nenhum efeito perceptível.	1

c) Critérios de Detecção (adaptado de Toledo e Amaral, 2006)

Oportunidade para detecção	Critérios: Probabilidade de Detecção através do Controle de Projeto	Classificação	Probabilidade de Detecção
Nenhuma oportunidade de detecção	Nenhum controle de projeto atual. Não se pode detectar ou não está analisado.	10	Praticamente Impossível
Improvável detectar em qualquer estágio	Os controles de análise/detecção de projeto têm uma fraca capacidade de detecção por meio de Análise Virtual (por exemplo, CAE, FEA, etc.).	9	Muito Remota
Após o "Congelamento" do Projeto (momento a partir do qual não se deve mais modificar o projeto) e antes do lançamento	Verificação/validação do produto, após o "Congelamento" do Projeto e antes do lançamento, com ensaios passa/falha.	8	Remota
	Verificação/validação do produto, após o "Congelamento" do Projeto e antes do lançamento, com ensaios de testes para falhar.	7	Muito Baixa
	Verificação/validação do produto, após o "Congelamento" do Projeto e antes do lançamento, com ensaios de degradação.	6	Baixa
Antes do "Congelamento" do Projeto	Validação do produto antes do "Congelamento" do Projeto, usando ensaios passa/falha.	5	Moderada
	Validação do produto antes do "Congelamento" do Projeto, usando testes para falhar.	4	Moderadamente Alta
	Validação do produto antes do "Congelamento" do Projeto, usando ensaios de degradação.	3	Alta
Análise Virtual Correlacionada	Os controles de análise/detecção de projeto têm uma forte capacidade de detecção por meio de Análise Virtual (por exemplo, CAE, FEA, etc.).	2	Muito Alta
Detecção não aplicável. Prevenção de Falha	A causa de falha ou modo de falha não pode ocorrer porque foi totalmente prevenida através de soluções de projeto.	1	Praticamente Certa

Durante a construção do avião, o eixo do trem de pouso é amarrado na fuselagem da aeronave em duas regiões. Assim, em todas as análises, o eixo do modelo do trem de pouso foi considerado engastado nestas duas regiões onde estão amarrados. Essa condição de contorno foi considerada em todas as análises. Para aplicação deste tipo de apoio no *software* ANSYS® foram restringidos os deslocamentos nas 3 direções, bem como, as rotações em relação aos eixos x, y e z. A Tabela 3 descreve as dimensões e as especificações do eixo do trem de pouso, e a Tabela 4 define as dimensões das rodas do trem de pouso.

Tabela 3 – Especificações do eixo do trem de pouso.

Eixo do Trem de Pouso			
Variável	Incógnita	Valor	Unidade
Diâmetro	\varnothing_{TP}	0,012	m
Comprimento	L_{TP}	0,212	m

Tabela 4 – Especificações das rodas do trem de pouso.

Rodas do Trem de Pouso			
Variável	Incógnita	Valor	Unidade
Diâmetro	\varnothing_r	0,08	m
Espessura	e_r	0,007	m

O eixo do trem de pouso de fibra de carbono é considerado quebradiço com característica frágil. As propriedades deste material ortotrópico estão descritas na Tabela 5. A roda do trem de pouso é fabricada de Nylon, material dúctil e isotrópico com as propriedades descritas na Tabela 6. Para a modelagem do comportamento mecânico destes materiais, foram utilizadas as propriedades de cada material descritas em seus respectivos quadros.

Tabela 5 – Propriedades da fibra de carbono 3K/Epóxi.

Laminado de Fibra de Carbono 3K/Epóxi		
Propriedades	Valor	Unidade
Densidade	1,57	g/cm ³
Módulo de Elasticidade X, Y	10,3	GPa
Módulo de Elasticidade Z	129,3	GPa
Coefficiente de Poisson XY	0,38	-
Coefficiente de Poisson YZ, XZ	0,25	-
Módulo de Cisalhamento XY	3,9	GPa
Módulo de Cisalhamento YZ, XZ	6,5	GPa
Resistência à Tração X, Y	65	MPa
Resistência à Tração Z	2100	MPa
Resistência à Compressão X, Y	132	MPa
Resistência à Compressão Z	1050	MPa
Resistência ao Cisalhamento X, Y, Z	75	MPa

Tabela 6 – Propriedades do Nylon Nitanyl

Nylon Nitanyl		
Propriedades	Valor	Unidade
Densidade	1,13	g/cm ³
Módulo de Elasticidade em Tração	1800	MPa
Módulo de Elasticidade em Flexão	2800	MPa
Resistência à Tração	60	MPa

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Reações no trem de pouso

As Tabelas 7, 8 e 9 descrevem e elencam as magnitudes das cargas de aterrissagem para as 3 condições a serem analisadas neste trabalho, aterrissagem com uma, duas e três rodas.

Tabela 7 – Magnitudes das cargas de aterrissagem para o pouso em uma roda.

Pouso de uma roda			
Variável	Incógnita	Valor	Unidade
Força vertical para o pouso em uma roda	F_{vp1}	390,59	N
Força horizontal para o pouso em uma roda	F_{hp1}	156,24	N

Tabela 8 – Magnitudes das cargas de aterrissagem para o pouso em duas rodas.

Pouso de duas rodas			
Variável	Incógnita	Valor	Unidade
Força vertical para o pouso em duas rodas	F_{vp2}	195,3	N
Força horizontal para o pouso em duas rodas	F_{hp2}	78,12	N

Tabela 9 – Magnitudes das cargas de aterrissagem para o pouso em três rodas.

Pouso em três rodas			
Variável	Incógnita	Valor	Unidade
Força vertical para o pouso em três rodas	F_{vp3}	166,00	N
Força horizontal para o pouso em três rodas	F_{hp3}	66,40	N
Força vertical na bequilha	F_{vbp3}	58,59	N
Força horizontal na bequilha	F_{hbp3}	23,43	N

Através dos cálculos obtidos pela teoria, a condição crítica de pouso foi definida como sendo pouso em 1 (uma) roda, onde a força atuante calculada foi de 390,59 N e, portanto, os componentes do sistema de aterrissagem serão mais exigidos nessa condição.

6.2. Eixo do trem de pouso

Para a análise do eixo do trem de pouso, algumas considerações foram feitas. Considerou-se o componente como uma viga bi-engastada nos pontos onde a fixação por amarração é feita, que é 6 (seis) centímetros para a esquerda e para a direita partindo do centro do eixo. Com isso a força atuante de 390,59 N foi aplicada em uma das extremidades do tubo, simulando, portanto, o pouso em uma roda.

Sendo assim, foi gerada a malha para simulação com resolução suficiente para a análise. Com isso foram verificadas as tensões mínima e máxima atuantes no eixo, bem como a deformação máxima, que podem ser vistas nas Figuras 4a, 4b e 4c, respectivamente.

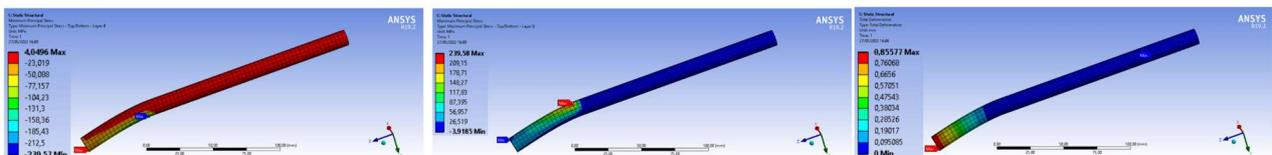


Figura 4 – Critério de Coulomb-Mohr no tubo: a) Mínima Tensão; b) Máxima Tensão; c) Deformação máxima.

Analisando as Figuras 4a e 4b e aplicando os critérios de Coulomb-Mohr, conclui-se que a máxima tensão equivalente aplicada no eixo do sistema é de 239,58 MPa. Analisando a Tabela 5 as resistências à tração e à compressão da fibra de carbono para o eixo Z, onde a fibra está localizada, escolhe-se a menor entre as duas, no caso a resistência à compressão, para verificar o dimensionamento do tubo, visto que a falha ocorrerá primeiro por compressão. Comparando a máxima tensão obtida de 239,58 MPa com a resistência a compressão da fibra no eixo Z de 1050 MPa, verifica-se que a tensão máxima encontrada no ANSYS® corresponde a aproximadamente 22,82% da tensão máxima suportada pelo tubo, e, portanto, o tubo está dimensionado e suportará os esforços requeridos.

Analisando a Figura 4c constata-se que a deformação máxima observada foi de aproximadamente 0,86 milímetros, situada na extremidade do tubo que está sofrendo os esforços de pouso.

6.3. Rodas do trem de pouso

Outro componente primordial do sistema são as rodas do trem de pouso. Para essa análise, o equipamento foi considerado engastado no ponto de apoio do eixo, que é seu ponto central. A força aplicada de 390,59 N na direção vertical, foi a força atuante calculada para a condição de pouso em uma roda.

Com isso, pôde-se observar que a tensão máxima equivalente de Von Mises no componente foi de 12,03 MPa e o deslocamento máximo observado foi de aproximadamente 0,16 milímetros, conforme ilustrado nas Figuras 5a e 5b.

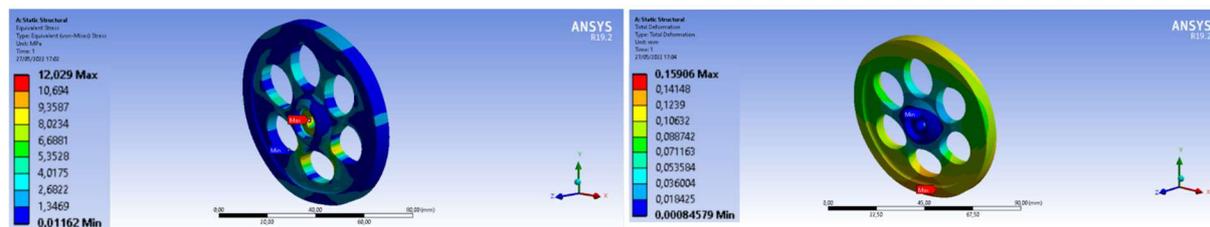


Figura 5 – a) Máxima tensão equivalente na roda do trem de pouso; b) Deformação máxima na roda do trem de pouso

Analisando a Tabela 6, a resistência à tração do Nylon com o qual a roda é fabricada vale 60 MPa, e comparando com a tensão máxima encontrada no ANSYS® tem-se que o esforço na roda corresponde 20,05% da máxima tensão suportada no componente, e, assim como o tubo, está dimensionada e suportará os esforços necessários.

6.4. Modo de análise e efeito de falha (FMEA)

Com os esforços atuantes no trem de pouso calculados, foi aplicado, junto à equipe Triângulo Aéreo AeroDesign, a metodologia FMEA (Modo de Análise e Efeito de Falha) dos dois componentes analisados. Inicialmente, foi definido o ponto da falha no equipamento a ser analisado, no caso o trem de pouso principal.

Na sequência, é feita a análise da falha separadamente para os dois componentes principais do trem de pouso. No eixo do trem de pouso, o modo de falha foi definido como ruptura, e seus efeitos são o comprometimento da estrutura e segurança da aeronave, o que resultaria na eliminação da bateria de voo em questão, prejudicando a equipe. As causas levantadas para a falha foram o subdimensionamento do componente ou geometria inadequada.

Para a roda do trem de pouso, foi definido o modo de falha como deformação plástica, e os efeitos dessa falha são o comprometimento da corrida de decolagem, que resultaria em perda de pontos pela equipe na competição. A causa principal levantada para essa falha foi o subdimensionamento da roda.

Após a análise da falha, foi realizada a avaliação de risco para cada componente, por meio do Número de Prioridade de Risco (NPR). Para o eixo do trem de pouso, o índice de frequência foi considerado 2, com falhas não observadas, associadas a projeto praticamente idêntico, ou em simulação e testes de projeto, visto que nunca foi verificada uma falha desse tipo pela equipe Triângulo Aéreo AeroDesign.

O índice de gravidade considerado foi 10, onde o modo de falha potencial afeta a operação segura da aeronave e/ou envolve não conformidade com regulamentação da competição, sem prévio aviso, visto que a falha do trem de pouso resulta na perda da bateria voada, resultando em diminuição da pontuação da equipe na competição.

O índice de detecção foi considerado 4, onde há validação do produto (ensaio de confiabilidade, testes de desenvolvimento ou validação), antes do "congelamento" do projeto, usando testes para falhar (por exemplo, até vazar, ceder, rachar, etc.), pois a equipe realiza um teste de impacto que consiste em lançar o sistema de aterrissagem contra um bloco de concreto com velocidade e força de impacto predeterminadas.

Multiplicando-se os três índices, foi obtido um Número de Prioridade de Risco (NPR) igual a 80 para o eixo.

Para a roda do trem de pouso, o índice de frequência considerado foi 3, somente falhas isoladas, associadas a projeto praticamente idêntico, ou em simulação e testes de projeto, visto que a roda nunca falhou em competições, mas já foram observadas potenciais falhas em simulações.

O índice de gravidade foi considerado 8, com perda da função primária (aeronave inoperável, não afeta a operação segura da aeronave), visto que a aeronave ainda pode voar, mas a corrida de decolagem e o pouso são prejudicados.

O índice de detecção foi considerado como 2, onde os controles de análise/detecção de projeto têm uma forte capacidade de detecção, e uma análise virtual (por exemplo, CAE (Engenharia Auxiliada por Computador), FEA (Análise de Elementos Finitos), etc.) está altamente correlacionada às condições operacionais reais esperadas antes do "congelamento" do projeto, visto que a equipe realiza análises de elementos finitos por *software* a cada ciclo de competição.

Multiplicando-se os três índices, foi obtido um Número de Prioridade de Risco (NPR) igual a 48 para a roda.

Como ação preventiva recomendada para o eixo, foram sugeridas simulações ou análise de elementos finitos a cada projeto, além de um teste de impacto no componente a cada projeto. Já para a roda, as ações preventivas sugeridas foram simulações ou análise de elementos finitos a cada projeto, além de um teste de carga no componente a cada projeto.

7. CONCLUSÃO

De acordo com as análises de esforços no trem de pouso, fica evidente que o sistema projetado para a competição de 2021 estava dimensionado, já que as tensões máximas aplicadas na condição crítica de pouso não ultrapassaram a tensão máxima permitida do material.

Para a roda de Nylon, foi observada a mesma condição, onde a tensão máxima aplicada não ultrapassou a tensão máxima permitida do material para a condição crítica de pouso.

Com o auxílio do FMEA, verificou-se que o Número de Prioridade de Risco (NPR) calculado para o eixo de fibra de carbono foi 80, enquanto para a roda de Nylon foi 48. Isso significa que entre os dois componentes o eixo do trem de pouso é o mais crítico e, portanto, requer atenção maior na etapa de projeto e construção, visto que sua falha pode provocar efeitos catastróficos para a equipe na competição.

8. REFERÊNCIAS

- Abeling, A. *Dimensionamento de um conjunto trem de pouso para Aerodesign*. Horizontina, RS. 2016.
- Belytschko, T; Fish, J. *Um Primeiro Curso em Elementos Finitos*. Tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury e Luiz Machado. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1941-3/>. Acesso em: 22 dez. 2021. (título original: A First Course in Finite Elements)
- Budynas, R. G.; Nisbett, J. K. *Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica*. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084 p.
- de Paula, Gilles. *O que é 5W2H: reduza incertezas, ganhe produtividade e aprenda como fazer um plano de ação*. Treasy, 2015. Disponível em: <<https://www.treasy.com.br/blog/5w2h/>>. Acesso em: 07 de jun. de 2022.
- Federal Aviation Administration. *FAR-PART 23, Part 23: Airworthiness Standards: Acrobat Category Airplanes*. 2002.
- Iscold, P.H.A.O. *Introdução às Cargas nas Aeronaves*. UFMG, 2002.
- Lobo, R. N. *Gestão da Qualidade*. São Paulo: Érica, 2020. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536532615/>. Acesso em: 01 jun. 2022.
- SAE Brasil. *SAE Brasil AeroDesign*. Disponível em: <<https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/aero-design-sae-brasil/>>. Acesso em: 01 jun. 2022.
- Silveira, A. M. da; Vilseke, A. J.; Pezzatto, Alan. T.; Gregório, G. F. P. *Confiabilidade de sistemas*. Porto Alegre: SAGAH, 2019. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595028456/>. Acesso em: 01 jun 2022.
- Toledo, J. C. de; Amaral, D. C. *FMEA – Análise do Tipo e Efeito de Falha*. UFSCar, 2006.

9. NOTA DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.