



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST
ENGENHARIA MECÂNICA – TCC 2019 - UEA EM ENG. MECÂNICA

UEA
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DO
A M A Z O N A S

SANCHES ISMAEL DE OLIVEIRA

**Reprojeto do trem de pouso de uma aeronave
cargueira rádio controlada por meio da integração
do DFMA (Design for Manufacturing and Assembly)
e Engenharia reversa (ER).**

MANAUS

2019

SANCHES ISMAEL DE OLIVEIRA

**Reprojeto do trem de pouso de uma aeronave
cargueira rádio controlada por meio da aplicação do
DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) e
Engenharia reversa (ER).**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título
de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
do Estado do Amazonas (UEA)

Orientador: Prof. MSc. Marcos Dantas dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Claudio Kieling

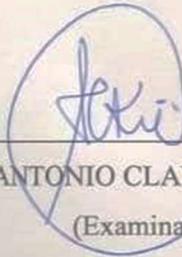
SANCHES ISMAEL DE OLIVEIRA

REPROJETO DO TREM DE POUSO DE UMA AERONAVE CARGUEIRA RÁDIO
CONTROLADA POR MEIO DA APLICAÇÃO DO DFMA (DESIGN FOR
MANUFACTURING AND ASSEMBLY) E ENGENHARIA REVERSA (ER).

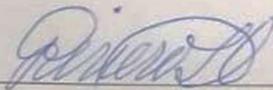
APROVADO POR:



PROF. Msc. MARCOS DANTAS DOS SANTOS (UEA)
(Orientador)



PROF. DR. ANTONIO CLAUDIO KIELING (UEA)
(Examinador)



PROF. DR. GABRIEL FREDERICO RIVERO LLERENA (UEA)
(Examinador)

MANAUS / AM, 16 DE DEZEMBRO DE 2019

48r

Oliveira, Sanches Ismael de

Reprojeto do trem de pouso de uma aeronave cargueira rádio controlada por meio da integração do DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) e Engenharia reversa (ER). / Sanches Ismael de Oliveira. Manaus : [s.n], 2019.
105 f.: color.; 8 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Industrial Mecânica -
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2019.

Inclui bibliografia

Orientador: Santos, Marcos Dantas dos

Coorientador: Kieling, Antonio Claudio

1. Trem de pouso. 2. DFMA. 3. Engenharia reversa.
4. Simulação. 5. Aerodesign. I. Santos, Marcos Dantas dos (Orient.). II. Kieling, Antonio Claudio (Coorient.). III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Reprojeto do trem de pouso de uma aeronave cargueira rádio controlada por meio da integração do DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) e Engenharia reversa (ER).

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por ter me guiado, ajudado e dado forças para vencer todas as dificuldades enfrentadas até aqui, pelo dom da vida, pela oportunidade de graduar em engenharia mecânica, que antes parecia tão longe e agora é realidade;

Ao meu pai José Sancler e a minha mãe Miracleia por terem acreditado em mim em todas as vezes que desacreditei, pelo amor, o esforço e apoio dado durante toda a etapa da graduação longe de casa;

A Emerson Araújo e Flávio José da equipe Moto Honda por terem acreditado no potencial e pela primeira oportunidade de trabalho, toda sabedoria e humildade repassados.

A Elias Gima, Rodrigo Sérgio e Janderlan Macedo por serem os primeiros orientadores da vida profissional, pela sabedoria repassada, e por toda a confiança durante o período de estágio.

Ao professor MSc. Marcos Dantas dos Santos pela confiança, ensinamento, dedicação e paciência na elaboração do trabalho realizado;

Aos professores da Universidade do Estado do Amazonas que muito contribuíram com os conhecimentos repassados ao longo do curso;

A equipe Urutau Aerodesign que durante excelentes três anos proporcionaram grandes conhecimentos e experiência nas competições e aos integrantes, que se tornaram parte da minha família e todo apoio oferecido;

As minhas tias e primas por terem ajudado no início dessa grande conquista ao me receber em suas casas durante os primeiros períodos;

Aos meus colegas e amigos da faculdade que muito contribuíram para meu crescimento acadêmico e profissional;

“Não importa o quão estreito seja o portão,
O quão carregado com castigos esteja o pergaminho,
Eu sou o mestre do meu destino,
Eu sou o capitão da minha alma.”

William Ernest Henley

RESUMO

O trabalho realizado, aborda o reprojeto do trem de pouso principal da equipe URUTAU Aerodesign, a qual participa da competição SAE Brasil AeroDesign anualmente, utilizando a metodologia DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*) integrado a ER (Engenharia Reversa). A principal causa para abordagem do tema foi observada durante a competição em São dos Campos – SP, onde durante a montagem do trem de pouso principal houveram grandes dificuldades, pois para montagem desse componente havia um grande número de peças, sendo a maioria apresentando dificuldades de montagem. Para isso buscou-se métodos que pudessem ajudar no reprojeto de um trem de pouso que apresentasse maior facilidade de montagem e conseqüentemente de fabricação, sendo então definido o método de Lucas do DFMA, que posteriormente viu-se que precisava de uma ferramenta auxiliar para poder utilizar o componente já existente como base de estudo, para isso foi definida a utilização da ER (engenharia reversa). Utilizando-se então no trabalho o método DFMA integrado a engenharia reversa como metodologia para o reprojeto, e seus parâmetros de avaliação para redimensionamento do quesito montagem. Posteriormente foi definida a geometria do componente reprojeto onde obteve-se reduções significativas para os índices de avaliação do método utilizado. Redução de 20 peças para apenas 6, que corresponde um ganho de 42% para análise funcional, reduções de 72% para análise de alimentação e 84% para análise de montagem. Por fim foram realizadas as simulações através do método de elementos finitos com a aplicação dos carregamentos no componente, para comprovar que o mesmo atendia os critérios estruturais exigidos pela competição e estava apto para ser fabricado e utilizado pela equipe na competição.

Palavras chave: Trem de pouso; DFMA; Engenharia reversa; Simulação; *Aerodesign*.

ABSTRACT

This work addresses the redesign of the main landing gear of the URUTAU Aerodesign team, which participates in the SAE Brasil AeroDesign competition annually, using the DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) methodology integrated with ER (Reverse Engineering). The main cause for approaching the theme was observed during the competition in São dos Campos - SP, where during the assembly of the main landing gear there were great difficulties, because for the assembly of this component there was a large number of parts, most of them presenting Assembly. For this we sought methods that could help in the design of a landing gear that presented greater ease of assembly and consequently manufacturing, and then defined the Lucas method of DFMA, which later found that needed an auxiliary tool to be able to Using the existing component as a basis for study, the use of RE (reverse engineering) was defined. Using in this work the DFMA method integrated reverse engineering as a methodology for the redesign, and its evaluation parameters for resizing the assembly requirement. Subsequently, the geometry of the redesigned component was defined where significant reductions were obtained for the evaluation indices of the method used. Reduction from 20 pieces to just 6, which corresponds to a 42% gain for functional analysis, 72% reductions for feed analysis and 84% for assembly analysis. Finally, the simulations were performed using the finite element method with the loading of the component to prove that it met the structural criteria required by the competition and was able to be manufactured and used by the team in the competition.

Keywords: Landing gear; DFMA; Reverse engineering; Simulation; Aerodesign.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-Trem de pouso triciclo e convencional..... | 15 |
| Figura 2 - Etapas para elaboração de projeto e aquisição de produto. | 20 |
| Figura 3 - Modelo básico com sequência de fases comuns..... | 21 |
| Figura 4 - Configurações do trem de pouso citado por RAYMER (1989), respectivamente...34 | |
| Figura 5 - Vista explodida dos componentes do trem de pouso, configuração triciclo..... | 34 |
| Figura 6 - Carga para o pouso em três rodas. | 36 |
| Figura 7 - Carga para o pouso em duas rodas..... | 36 |
| Figura 8 - Carga para pouso em uma roda..... | 36 |
| Figura 9 - Ensaio de queda livre de trem pouso. | 38 |
| Figura 10 - Fluxograma de um projeto segundo Ashby..... | 39 |
| Figura 11- Nós e elementos presentes em uma malha..... | 44 |
| Figura 12 - Diagrama esquemático tensão-deformação. | 42 |
| Figura 13 - Diagramas de tensão-deformação convencional e real para um material dúctil.... | 43 |
| Figura 14 - Sequência de atividades que caracterizam a aplicação da ER..... | 22 |
| Figura 15 - Redução de peças com o reprojeto. | 24 |
| Figura 16 - Redução de partes de montagem. | 24 |
| Figura 17 - Facilidade de montagem. | 25 |
| Figura 18 - Melhoramento de inserção..... | 25 |
| Figura 19 - Simplificação de orientação..... | 25 |
| Figura 20 - Fluxograma do método de Boothroyd. | 27 |
| Figura 21 - Fluxograma do método de Lucas..... | 30 |
| Figura 22 - Fluxograma do procedimento do projeto..... | 47 |
| Figura 23 - Aeronave utilizada na competição 2018..... | 48 |
| Figura 24 - Classificação dos itens do trem de pouso principal..... | 50 |
| Figura 25 - Trem de pouso atual..... | 55 |
| Figura 26 - Seleção para remoção de itens conforme análise..... | 55 |
| Figura 27 - Esboço do novo trem de pouso..... | 56 |
| Figura 28 - Chapa principal..... | 57 |
| Figura 29 - Roda..... | 57 |
| Figura 30 - Eixo de conexão..... | 58 |
| Figura 31 - trem de pouso conceitual | 58 |
| Figura 32 - Esquema para distribuição de carregamento estático | 64 |
| Figura 33 - Resultado da tensão de Von Misses - Material: Poliacetal..... | 67 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 34 - Resultado da tensão de Von Misses - Material: Nylon..... | 67 |
| Figura 35 - Resultado da tensão de Von Misses - Material: Alumínio | 68 |
| Figura 36 - Deslocamento da roda - Material: Poliacetal. | 68 |
| Figura 37 - Deslocamento da roda - Material: Nylon..... | 69 |
| Figura 38 - Deslocamento da roda - Material: Alumínio | 69 |
| Figura 39 - Resultado da análise de tensão do trem de pouso conceitual. | 70 |
| Figura 40 - Resultado da análise de deslocamento do trem de pouso conceitual..... | 71 |
| Figura 41 - Resultado da análise de deslocamento para o Drop test. | 72 |
| Figura 42 - Resultado da análise de deformação no Drop test. | 72 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Parâmetros de análise de manuseio..... | 32 |
| Quadro 2 - Parâmetros para a análise de ajuste manual | 33 |
| Quadro 3 - Principais componentes da aeronave. | 49 |
| Quadro 4 - Materiais utilizados | 63 |
| Quadro 5 - Intensidade dos carregamentos de acordo com cada situação de pouso. | 65 |
| Quadro 6 - Tensões admissíveis com fator de segurança de 1,5. | 66 |
| Quadro 7 – Resultado da análise da roda, com comparativo entre materiais. | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Análise funcional do trem de pouso..... | 52 |
| Tabela 2 - Resultado da análise de manuseio do trem de pouso | 53 |
| Tabela 3 - Resultado da análise de montagem do trem de pouso..... | 54 |
| Tabela 4 - Análise funcional do trem de pouso conceitual..... | 60 |
| Tabela 5 - Resultado da análise de manuseio do trem de pouso conceitual..... | 61 |
| Tabela 6 - Resultado da análise de montagem do trem de pouso conceitual. | 62 |

SUMÁRIO

| | |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 Problematização e hipóteses | 16 |
| 1.1.1 Hipóteses | 17 |
| 1.2 Objetivos..... | 17 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 17 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 17 |
| 1.3 Justificativa | 17 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 19 |
| 2.1 O processo de desenvolvimento do produto | 19 |
| 2.7 Projeto detalhado do trem de pouso principal | 33 |
| 2.7.1 Forças atuantes | 34 |
| 2.8.5 Fator de carga no solo | 35 |
| 2.7.2 Critérios para cargas de pouso | 35 |
| 2.7.3 Drop test..... | 37 |
| 2.8 Critério de seleção de materiais | 38 |
| 2.8.1 Materiais utilizados para fabricação do trem de pouso..... | 40 |
| 2.9 Análise pelo MEF | 43 |
| 2.10 Critério de falha | 41 |
| 2.10.1 Deformação Elástica | 42 |
| 2.10.2 Deformação plástica..... | 43 |
| 2.11 Engenharia Reversa | 21 |
| 2.12 <i>Design for Manufacture and Assembly</i> (DFMA) | 22 |
| 2.13 Comparação entre o método de Lucas e Boothroyd | 25 |
| 2.13.1 Método Boothroyd-Dewhurst | 26 |
| 2.13.2 Método Lucas..... | 29 |
| 3 METODOLOGIA..... | 45 |
| 3.1 Métodos | 45 |
| 3.2 Técnicas | 45 |
| 3.3 Procedimentos..... | 46 |
| 4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS..... | 48 |
| 4.1 Seleção do componente | 48 |
| 4.2 Aplicação da ER e Pré – análise DFMA..... | 50 |
| 4.2.1 Análise funcional..... | 51 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.2 Análise de alimentação..... | 52 |
| 4.2.3 Análise de montagem | 53 |
| 4.3 Especificar, documentar e reprojeta utilizando a engenharia reversa | 54 |
| 4.4 Geometria e modelagem | 56 |
| 4.5 Análise DFMA..... | 59 |
| 4.5.1 Análise funcional | 59 |
| 4.5.2 Análise de alimentação..... | 60 |
| 4.5.3 Análise de montagem | 61 |
| 4.6 Simulação utilizando o método de elementos finitos | 62 |
| 4.6.1 Definição de geometria | 63 |
| 4.6.2 Definição de material | 63 |
| 4.6.3 Atribuição de cargas..... | 64 |
| 4.6.4 Simulação | 66 |
| CONCLUSÃO..... | 73 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |
| APÊNCIDE A - SIMULAÇÃO DA RODA COM MATERIAL PA | 79 |
| APÊNDICE B - SIMULAÇÃO DA RODA COM MATERIAL NYLON..... | 84 |
| APÊNDICE C - SIMULAÇÃO DA RODA COM MATERIAL ALUMÍNIO | 89 |
| APÊNDICE D - SIMULAÇÃO DA CHAPA PRINCIPAL UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO..... | 93 |
| APÊNDICE E - SIMULAÇÃO DE DROP TESTE DO TREM DE POUSO..... | 98 |

1. INTRODUÇÃO

A Competição SAE AeroDesign ocorre nos Estados Unidos desde 1986, tendo sido concebida e realizada pela SAE International. A partir de 1999 esta competição passou a constar também do calendário de Programas Estudantis da SAE BRASIL. A competição SAE Brasil Aerodesign se trata de 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.

A Urutau Aerodesign é uma equipe que representa a Escola Superior de Tecnologia-EST da UEA na competição, que ao longo de sua existência, tornou-se visivelmente um evento crescente em quantidade e qualidade dos projetos participantes, onde é desafiada anualmente com novos regulamentos baseados em desafios reais enfrentados pela indústria aeronáutica, é formada por estudantes de diversas engenharias e professores.

O trem de pouso em uma aeronave tem como função principal apoiar o avião no solo e manobrá-lo durante os processos de taxiamento, decolagem e pouso. Na maioria das aeronaves o trem de pouso utilizado possui rodas, porém existem casos onde são utilizados flutuadores em hidroaviões e esquis para operação em neve. O trem de pouso pode ser classificado basicamente em duas categorias de acordo com a disposição das rodas em triciclo ou convencional (RODRIGUES,2011).

Figura 1-Trem de pouso triciclo e convencional.



Fonte: RODRIGUES (2011).

O reprojeto de produtos pode ser visto como um meio de execução das estratégias competitivas de empresas. Esta técnica, quando inserida em uma metodologia para implementação de melhorias em produtos, toma como ponto de partida as especificações técnicas de um produto já lançado no mercado, objetivando o aperfeiçoamento tecnológico e não a simples cópia do produto já existente (DIAS, 1998). No que tange ao desenvolvimento

ou adaptação de um produto, o ponto crítico para a ER é a formulação de especificações desse novo produto, sendo, para tanto, necessárias atividades de pesquisa e desenvolvimento.

A engenharia reversa (ER) é uma atividade que trabalha com um produto existente (um software, um componente mecânico, um produto eletromecânico etc.) e tenta entender como este produto funciona e o que ele faz exatamente (todas as suas propriedades em quaisquer circunstâncias). Utiliza-se a engenharia reversa quando se deseja trocar ou modificar uma peça (ou um software) por outra, com as mesmas características, mas não se têm em mãos todas as informações sobre essa peça. Basicamente, consiste na tentativa planejada e organizada de obter tecnologia (produto e processo) através da análise de produtos de referência (os melhores daquele segmento) (INGLE, 1994). A principal aplicação da ER é no reprojeto e aperfeiçoamento de peças já existentes, nas quais sejam desejadas melhorias, tais como redução de custo ou mesmo inclusão de novas características ao produto. Além disso, um projeto de ER permite, através da construção de peças de reposição, fora de linha ou de difícil acesso, manter equipamentos obsoletos em funcionamento (MURY, 2000).

O projeto para manufatura e montagem (DFMA) visa que o projeto de produto e o planejamento da produção aconteçam simultaneamente, a partir de um conjunto de princípios. Já no reprojeto, o DFMA ajuda a adequar o produto da melhor maneira às características da produção e montagem, procurando melhorar a qualidade e reduzir o tempo de manufatura e montagem (DUFOUR, 1996).

O método DFMA é muito utilizado como apoio para melhorar o conceito de projetos ou um projeto já existente, de maneira que otimize as etapas de fabricação e montagem, quando integrado a ER, pode ser realizada uma avaliação mais precisa e holística obtendo maiores ganhos.

O presente estudo possibilitará amplo conhecimento a todos os estudantes que buscam melhorar a qualidade de projetos que participam de competições, que tem como principais finalidades a redução de peso, redução de etapas de fabricação e montagem que interferem diretamente com custo e a qualidade final do projeto.

1.1 Problematização e hipóteses

Como reprojeter o conjunto trem de pouso de uma aeronave a fim de melhorar os processos de fabricação de montagem?

1.1.1 Hipóteses

H0: O DFMA integrado a ER é o método ideal para melhorar as características de confecção e montagem do projeto de um conjunto trem de pouso da aeronave quando comparado a outros métodos, pois utiliza o projeto já existente para a elaboração de um novo e melhorado.

H1: O DFMA sozinho é um método eficaz para elaboração do trem de pouso projeto da aeronave considerando a facilidade na montagem e manufatura.

O método abordado no presente trabalho, terá foco em reprojetar e formular uma padronização para etapas de criação de projetos do trem de pouso de uma aeronave visando reduzir a quantidade de peças confeccionadas no processo de manufatura, reduzir o tempo de montagem e por consequência aumentar a qualidade do projeto, de maneira que este venha obter melhores resultados durante a competição. O modelo referência que irá ser utilizado como base para o reprojeto e reformulação será o trem de pouso da equipe Urutau Aerodesign, participante da competição nacional SAE Brasil AeroDesign. A aeronave está sujeita aos critérios de projeto determinados de acordo com o regulamento da competição na categoria ADVANCED no ano de 2018.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo aplicar o método de projeto voltado a fabricação e montagem (DFMA) integrada a engenharia reversa (ER) para o reprojeto do conjunto trem de pouso de uma aeronave destinada a competição SAE Brasil Aerodesign.

1.2.2 Objetivos específicos

- Utilizar o método DFMA para otimizar a fabricação e montagem do trem de pouso;
- Aplicar a engenharia reversa para comparar e reprojetar;
- Analisar as dificuldades de montagem (funcional, alimentação e encaixe);
- Comparar os resultados após o reprojeto com a atual abordada pela equipe;
- Utilizar o método de Lucas para calcular os ganhos do reprojeto.

1.3 Justificativa

O mercado está cada vez mais exigente com as especificações dos produtos, algo que vem contribuindo para a atualização e otimização destes, visto que é necessário está em

constante evolução para poder atender as necessidades, com redução de tempo, melhorias de fabricação, melhorias de montagem e um produto final desejável. Para as empresas é vital que os custos de fabricação sejam reduzidos, que os tempos de processo possam ser melhorados de forma que estes sejam mais eficientes, alcançando melhores parâmetros e maior qualidade.

Na competição SAE Brasil Aerodesign não é diferente, a competição premia as equipes que melhor desenvolvem seus projetos, atendendo os requisitos do regulamento, onde surgem limitações que exigem das equipes a constante busca pela melhoria das aeronaves, através de otimizações, técnicas sofisticadas que visam alcançar bons resultados

O motivo dominante para elaboração do trabalho foi a verificação de dificuldades durante as etapas de fabricação e construção dos itens do trem de pouso, visto que devido as dificuldades levava-se um elevado tempo para a fabricação e montagem. É possível, desta forma, analisar através da ER todas as etapas de fabricação e montagem, verificando o que pode ser alterado, neste momento entra em ação o DFMA, auxiliando como deve ser alterado possibilitando uma redução na quantidade de peças, acelerando o processo de montagem consequentemente reduzindo o tempo total do início ao fim do projeto do trem de pouso.

O método DFMA é muito utilizado como apoio para melhorar o conceito de projetos ou um projeto já existente, de maneira que otimize as etapas de fabricação e montagem, quando integrado a ER, pode ser realizada uma avaliação mais precisa e holística obtendo maiores ganhos. Este estudo tem como finalidade fornecer uma opção para reprojeter e formular uma padronização para etapas de criação de projeto de uma aeronave, visando reduzir a quantidade de peças confeccionadas no processo de manufatura, reduzir o tempo de montagem e por consequência aumentar a qualidade do projeto, de maneira que este venha obter melhores resultados durante a competição. A pesquisa também auxiliará a Instituição de Ensino e a equipe de competição sobre os reflexos da importância da otimização e padronização que proporciona redução de tempo e custos no projeto e fabricação da aeronave, através da implementação do método integrado entre o DFMA e a ER.

É possível, desta forma, assegurar que a aeronave passará por uma redução de peso e complexidade de projeto, possibilitando que em caso de quedas e quebra de partes da aeronave, sejam feitas substituições rápidas e efetivas, que é fundamental durante a participação da competição. O estudo sobre o método integrado entre DFMA e ER, será auxiliado por softwares CAD/CAE que irão analisar se as alterações serão efetivas e não irão afetar a confiabilidade aeronave, permitindo que a finalidade da aeronave, que é o voo, seja atingida.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O processo de desenvolvimento do produto

Para ROSA (2006), um projeto sempre inicia como uma ação de resposta a uma necessidade detectada e que deve ser atendida. As etapas de definição de necessidades e busca de informações é o que mais recentemente se está denominando de projeto informacional. Onde entende-se por projeto como sendo um conjunto de atividades inter-relacionadas que têm por objetivo conceber e definir completamente um produto, de forma que possa ser produzido. O projeto de um produto inicia quando é estabelecida a necessidade deste produto.

Segundo Rozenfeld et al. (2006), desenvolver produtos consiste em um conjunto de atividades por meio das quais se busca, a partir das necessidades do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, e considerando as estratégias competitivas e de produto da empresa, chegar a especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção para que a manufatura seja capaz de produzi-lo.

Para Toledo et al. (2008), o processo de desenvolvimento de produto (PDP) é considerado, cada vez mais, um processo crítico para a capacidade competitiva das empresas, tendo em vista a necessidade, de um modo geral, de renovação frequente das linhas de produtos, redução dos custos e prazos de desenvolvimento, desenvolvimento de produtos mais adequados às necessidades do mercado e, para empresas que participam de redes de fornecimento de componentes e sistemas, capacitação para participar de estratégias de desenvolvimento conjunto (co-design) com os clientes.

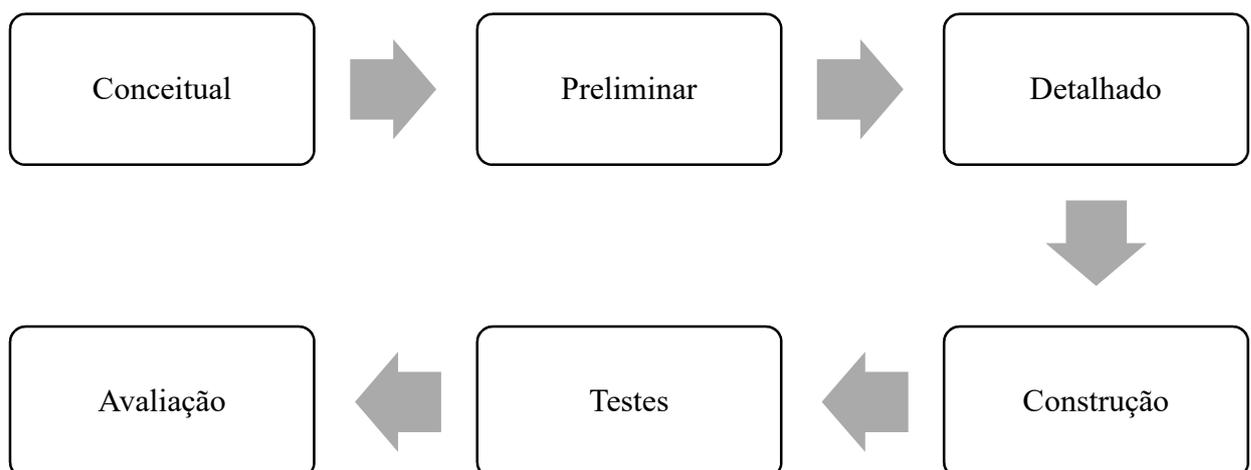
Para continuar o desenvolvimento de novos produtos é necessário que os atuais sejam melhorados, otimizados e com maior qualidade, aumentando a eficiência do produto, fornecendo melhores opções para o mercado. Especificamente falando do processo de execução do projeto de criação de produtos, as principais alterações nesta área são decorrentes de avanços ocorridos nos recursos informatizados (SOUZA,2010).

- Softwares de auxílio ao projeto (Computer Aided Design - CAD): são recursos que podem ser considerados como ferramentas que praticamente materializam a idéia dos projetistas. Obviamente o tempo gasto com operações específicas de detalhamentos de desenhos fica mais reduzido quando é tratado por projetistas mais experientes no software, porém não necessariamente são os usuários com mais tempo de utilização.

- Softwares de auxílio à manufatura (Computer Aided Manufacturing - CAM): este tipo de recurso, além de permitir a otimização do processo produtivo, sobretudo em processos de usinagem, permite também a obtenção de protótipos mais rápidos e mais funcionais a um custo menor.
- Softwares para análise de esforços (Computer Aided Engineering - CAE): servem para auxiliar nos cálculos de estruturas e solicitação de esforços em cada parte do modelo matemático criado pelo CAD. Este recurso, em conjunto com os dois anteriores, são os que mais ajudaram a aumentar o grau de complexidade dos produtos atuais, com um detalhamento mais rápido, esforços pré-calculados e manufatura otimizada, os produtos cada vez mais vão poder ter seus limites tecnológicos esgotados ou transpassados;
- Métodos para simulações de movimentos, análise estruturais e imagens fotorealistas: além dos processos de prototipagem rápida, também têm contribuído muito neste processo de facilitar as definições dos projetos atuais de produtos e, conseqüentemente, no crescimento do nível de complexidade destes;
- Recursos tecnológicos para testes funcionais dos produtos: cada vez mais existe a necessidade de penetração de novos mercados mundiais;

Para ROSA (2006), a sequência de etapas para a elaboração do projeto de um produto pode ser descrita como:

Figura 2 - Etapas para elaboração de projeto e aquisição de produto.

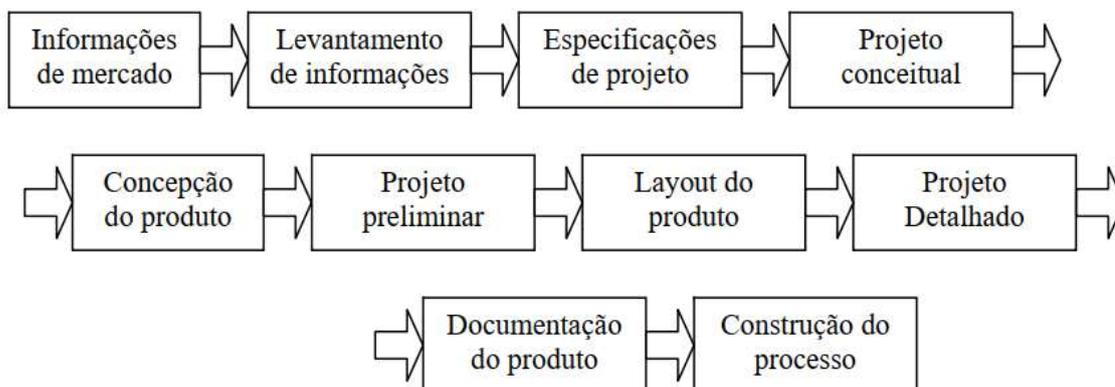


FONTE: ROSA (2006)

Esta sequência deve ser efetuada a diferentes níveis de detalhamento, ou seja, ao nível do produto como um todo, ao nível e montagens e ao nível de peças e seus detalhes.

Ogliari (1999) também estabelece um modelo básico que compreende a sequência para elaboração de produto.

Figura 3 - Modelo básico com sequência de fases comuns.



Fonte: SOUZA (2010)

2.2 Engenharia Reversa

A engenharia reversa (ER) é uma ferramenta muito importante, e esta técnica tem sido amplamente reconhecida como sendo um passo importante no ciclo de desenvolvimento de produtos. O uso da ER diminui o tempo e os custos para chegar-se ao novo produto. Em contraste com as sequências tradicionais de desenvolvimento de produtos, a engenharia reversa normalmente começa com a medição de um produto de referência, de modo que um modelo sólido pode ser deduzido, a fim de fazer uso das vantagens tecnológicas existentes (GUEDES et al, 2010).

A principal aplicação da ER é no reprojeto e aperfeiçoamento de peças já existentes, em que sejam desejadas melhorias, tais como redução de custo ou mesmo inclusão de novas características ao produto (MURY, 2000).

A ER inicia o processo de reprojeto, em que um produto é previsto, observado, desmontado, analisado, testado, experimentado e documentado em termos de funcionalidade, forma, princípios físicos, manufaturabilidade e montabilidade (Otto e Wood, 1998)

De acordo com SOUZA (2007, apud Ferreira et al.,2001) mencionam que a ER é uma técnica usada para recuperar a informação dos documentos do software e do seu código fonte, visando obter a sua representação em um alto nível de abstração facilitando a compreensão do sistema.

SOUZA (2007, apud Braga 2006) e Peres et al. (2006), simplificam dizendo que a ER é o oposto da engenharia convencional de desenvolvimento de softwares. O ciclo de vida parte de um nível de abstração mais baixo (forma detalhada de entendimento do problema) para o nível mais alto, sendo que no sistema convencional quanto mais o projeto avança, mais baixo é seu nível de abstração.

Anquetil (2006) define a ER como sendo a ação de analisar um sistema com dois objetivos: identificar os componentes do sistema e as relações entre eles e criar uma representação do sistema em outra forma ou em um nível de abstração mais alto. Ele faz uma comparação ao processo de obtenção de detalhes construtivos de uma bomba mecânica a partir de uma existente na qual não se tem mais disponível a documentação para sua especificação e aquisição.

GUEDES (2006, apud Ingle,1994) define a ER como um processo de levantamento de informações sobre um produto de referência através da sua desmontagem, com o objetivo de determinar como ele foi desenvolvido, desde seus componentes separados até o produto final. Sua abordagem defende claramente a aplicação da Engenharia Reversa com o objetivo de gerar um produto o mais similar possível ao original com um nível de investimento que possa garantir a geração de lucros ao empreendimento (Retorno sobre o Investimento).

A aplicação da ER em quatro estágios, que são: desmontagem, medição e testes, recuperação de dados técnicos e, por fim, a construção de protótipos.

Figura 4 - Sequência de atividades que caracterizam a aplicação da ER.



Fonte: INGLE (1994)

2.3 Design for Manufacture and Assembly (DFMA)

Boothroyd (2002) considera a manufatura como o processamento para obtenção individual de componentes, seja de conformação ou de transformação, e montagem a junção ou união de diversos componentes para formação de um produto completo ou subconjuntos deste

produto. Sendo assim nenhuma manufatura será considerada como montagem, assim como também não serão os processos como usinagem, moldagem, etc.

A técnica de DFMA é geralmente separada em duas abordagens, o projeto para manufatura (DFM) e o projeto para montagem (DFA) (SOUZA,2007).

O DFMA visa que o projeto de produto e o planejamento da produção aconteçam simultaneamente a partir de um conjunto de princípios. Já no reprojeto, o DFMA ajuda a adequar o produto da melhor maneira às características da produção e montagem, procurando melhorar a qualidade e reduzir o tempo de manufatura e montagem (DUFOUR, 1996).

O DFMA é um procedimento sistemático que visa identificar, quantificar e eliminar o desperdício ou a ineficiência no design de um produto e, assim, ajudar as empresas a aproveitar ao máximo os processos de fabricação existentes e manter o número de peças em uma montagem. Consegue isso possibilitando a análise de ideias de design. Não é um sistema de design, e qualquer inovação deve vir da equipe de projeto, mas fornece quantificação para ajudar na tomada de decisões nos estágios iniciais do projeto (Dochibhatla e Bhattacharya, 2017).

De acordo com Boothroyd e Dewhurst (2002), os requisitos da concepção original devem ser reavaliados para estabelecer os novos requisitos de qualidade DFMA, considerando sempre os seguintes princípios básicos do projeto para manufatura (DFM) e do projeto para montagem (DFA): simplicidade (diminuir o número de partes, sequência de manufatura mais curta etc.); materiais e componentes padronizados; liberar tolerâncias (evitar tolerâncias muito justas, que implicam em custos altos); uso de materiais mais processáveis; reduzir operações secundárias; utilizar características especiais de processo (tirar vantagem das capacidades especiais dos processos de manufatura, eliminando operações onerosas e desnecessárias); evitar limitações no processo.

Segundo SOUZA (2007), através da aplicação da técnica do DFMA, pode-se identificar como os recursos disponíveis na produção podem interferir no sucesso do projeto, buscando analisar detalhes no produto com o objetivo final de aproveitar melhor os recursos industriais da empresa, sempre mantendo o atendimento às necessidades dos clientes, através da simplificação nos processos de fabricação e montagem e da redução de custos.

Figura 5 - Redução de peças com o reprojeto.

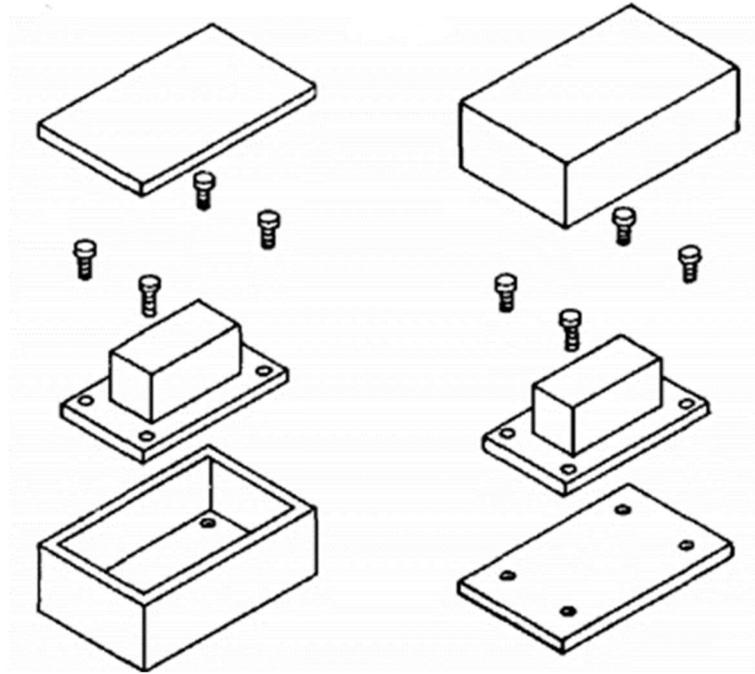


Figura 6 - Redução de partes de montagem.

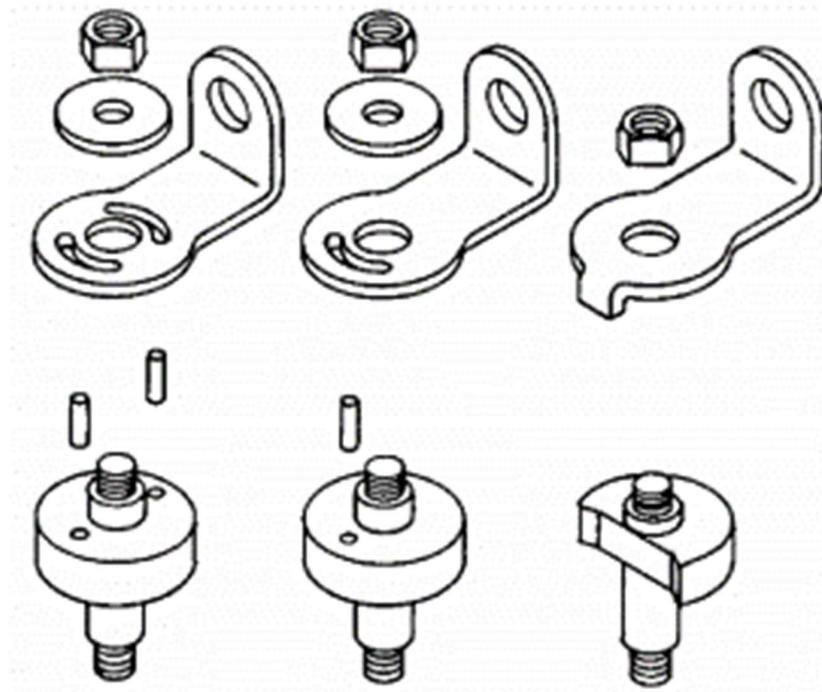


Figura 7 - Facilidade de montagem.

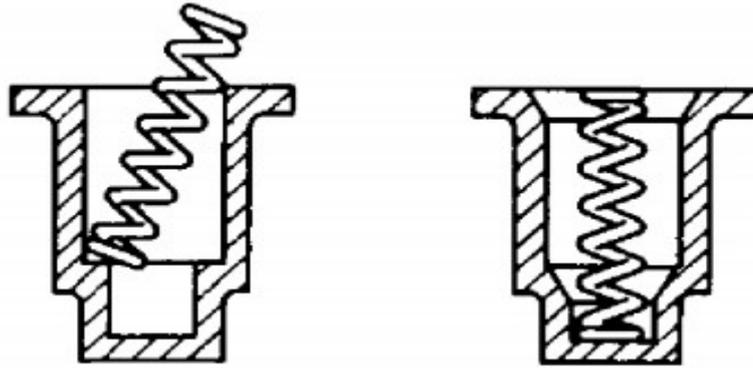


Figura 8 - Melhoramento de inserção.

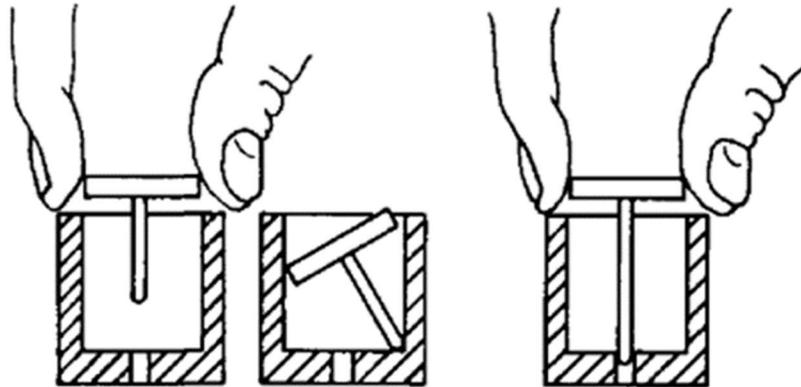
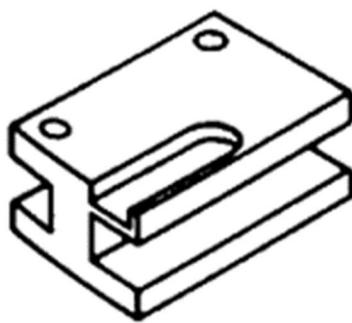
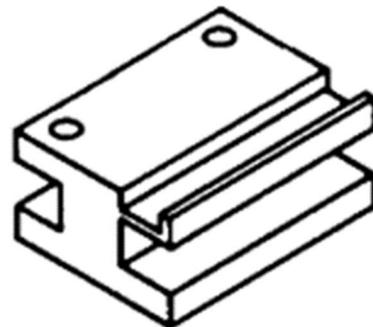


Figura 9 - Simplificação de orientação.



(a) Alta dificuldade de orientação



(b) Possibilita uma fácil orientação

2.4 Comparação entre o método de Lucas e Boothroyd

Os princípios do DFA são amplamente utilizados para facilitar a montagem / fabricação de um projeto em geral. Existem vários métodos que usam os princípios do DFA para quantificar a eficiência do design. Os métodos aprovados da indústria mais comumente usados

são o método de Lucas e o método de Boothroyd- Dewhurst. Os métodos de Lucas e Boothroyd são abordagens diferentes no DFA; o primeiro é usado para analisar o design do produto sem necessidade de dimensões específicas. Por outro lado, para usar o método Boothroyd, assume-se que o designer já possui todas as dimensões da peça (desenho paramétrico) (Dochibhatla e Bhattacharya, 2017).

O método Boothroyd-Dewhurst é baseado no tempo de cada um dos movimentos de manipulação e inserção. Embora estejam disponíveis tabelas de dados, os números mais precisos são compilados através de estudos de tempo em fábricas específicas.

O método Lucas DFA foi desenvolvido no início dos anos 80 pela Lucas Corp. no Reino Unido. Ao contrário do método de Boothroyd-Dewhurst, o método de Lucas é baseado em uma "escala de pontos" que fornece uma medida relativa de dificuldade de montagem (SALUSTRI,2005).

Os métodos Boothroyd-Dewhurst e Lucas foram a maneira mais antiga e inequívoca de calcular a montagem de um produto. Ambos os métodos têm uma abordagem completamente diferente para encontrar a eficiência do design e outros parâmetros relacionados. A diferença notável entre esses dois métodos é que, enquanto o método de Lucas é baseado em escala pontual, o Boothroyd-Dewhurst usa o tempo como seu principal critério. Ambos os métodos DFA são igualmente importantes e necessários para desenvolver o produto mais eficiente com um número mínimo de peças.

2.4.1 Método Boothroyd-Dewhurst

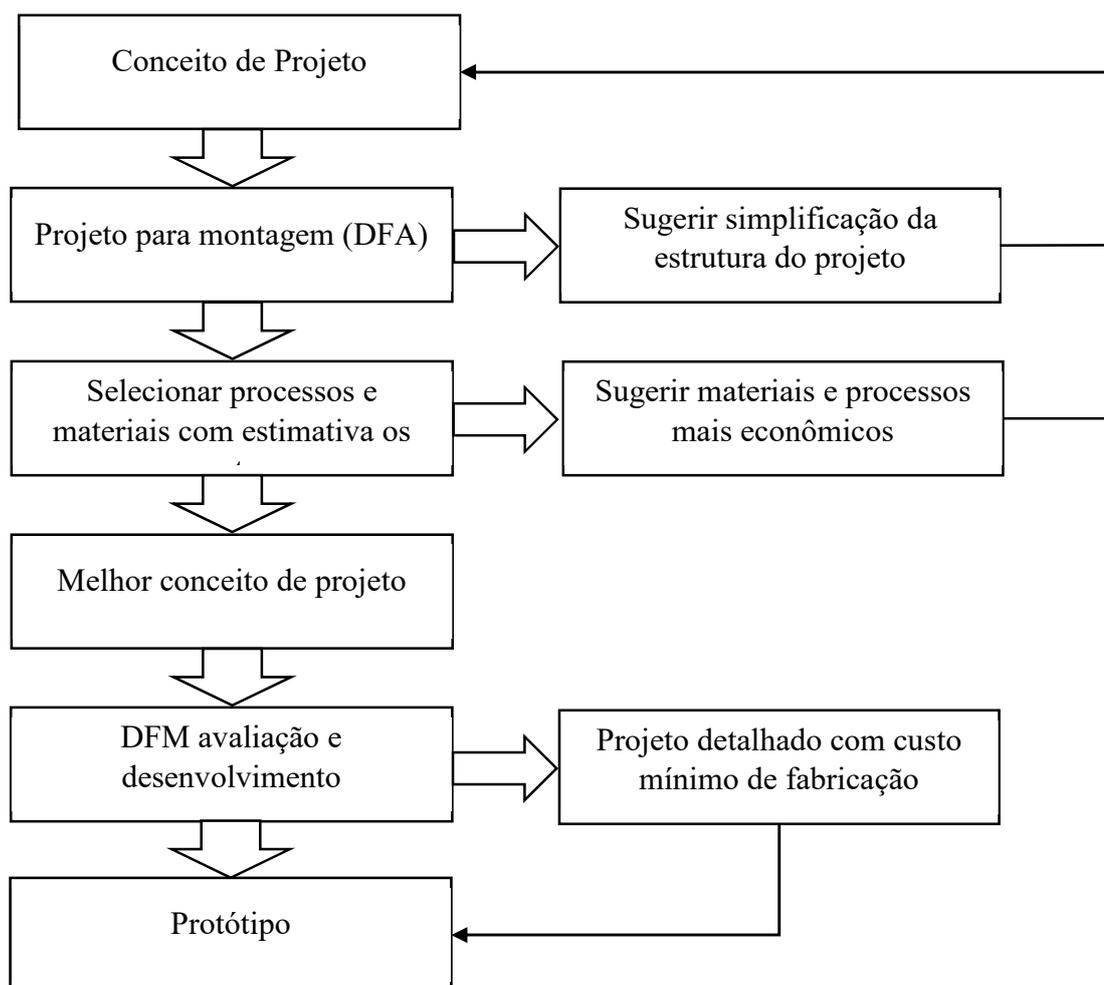
O método de processo Boothroyd-Dewhurst necessita duas etapas; Na primeira etapa, cada parte do projeto é avaliada com base nas diretrizes definidas no “Boothroyd-Handbook”, para classificar ou como uma parte essencial ou não essencial. As partes essenciais são tipicamente as partes funcionais; alguns exemplos de peças não essenciais são parafusos, arruelas, etc., que não contribuem diretamente para a funcionalidade do produto, mas são usados apenas para manter outras peças no lugar. Como regra geral, a integração de produtos deve eliminar as partes não essenciais para melhorar a eficiência do design.

Ele começa com o conceito de design e os métodos do DFA são usados para simplificar a estrutura do projeto. Em seguida, materiais adequados são escolhidos; Aqui, os métodos do DFA são usados para escolher materiais econômicos para o processo. Uma vez que a estrutura do projeto tenha sido simplificada e os materiais econômicos escolhidos, o conceito de projeto é finalizado e, novamente, os métodos DFA são usados para acessar o custo de projeto e

fabricação. Se os resultados forem satisfatórios, o design é finalizado e o protótipo é produzido (Dochibhatla e Bhattacharya, 2017).

Na segunda etapa, as tabelas Boothroyd para manipulação e inserção são utilizadas para estimar o tempo de apreensão, manipulação e inserção da peça. No final deste processo, a eficiência do sinal de parte (EM) é determinada; Mudanças adequadas são feitas no projeto inicial e o novo design é reavaliado.

Figura 10 - Fluxograma do método de Boothroyd.



FONTE: Dochibhatla e Bhattacharya, 2017

A eficiência do projeto é calculada usando a equação definida por Boothroyd, que foi derivada e validada com base em várias experiências na avaliação do projeto do produto. Além disso, a Equação (1) é mais precisa para montagem manual, e como o método de montagem era manual em todos os estudos de caso abordados por Boothroyd, esta equação está sendo usada no papel para calcular a eficiência do projeto.

$$EM = \frac{3 * NM}{TM} \quad (5)$$

Onde:

EM = eficiência de montagem

NM = número teórico de peças,

TM = tempo total de operação

Segundo Boothroyd (2002), o tempo aproximado para manuseio e inserção é de 3 segundos em média, para uma peça perfeitamente projetada - 1,5 seg. para manuseio, 1,5 seg. para encaixe. O tempo de montagem (TM) é a soma dos tempos de manipulação e inserção calculados usando as tabelas elaboradas por Boothroyd em seu manual de montagem. Para uma peça perfeitamente projetada, o valor de TM deve ser de 3 segundos e NM deve ser 1, o que dá uma eficiência de Design de 100%.

Boothroyd, Dewhurst e Knight (2002) comentam que os objetivos principais esperados com a técnica do DFMA são:

- Promover uma ferramenta para garantir que os projetistas ou time de desenvolvimento façam considerações eficientes sobre a produtibilidade nas fases iniciais do projeto, o que diminui o perigo de dar-se foco somente na função do produto;
- Guiar o projetista ou equipe na simplificação do produto e, conseqüentemente, nas reduções de custos, diretamente no custo da operação de montagem e na quantidade de peças e indiretamente no custo de produtibilidade com a redução da complexidade dos componentes confeccionados interna ou externamente;
- Agrupar, disponibilizar e difundir as experiências que geralmente ficam mantidas com os projetistas mais experientes, tornando o processo mais inteligente e auto-suficiente através da disseminação das idéias analisadas, gerando um processo de crescimento do nível das análises a cada novo produto;
- Estabelecer uma base de dados aplicáveis em análises posteriores de estudos de tempos de montagem e fatores de custo para diversas condições de projeto de produto;
- Melhorar a comunicação entre os departamentos envolvidos no processo de criação de produtos da empresa e o líder do projeto para que as decisões realizadas durante o processo fiquem bem documentadas e disponíveis para futuras consultas;

- Abrir e manter o canal de comunicação entre os profissionais da manufatura e a engenharia de produto possibilitando que qualquer melhoria futura, tanto no produto como no processo, sejam analisadas e tratadas de forma mais eficiente.

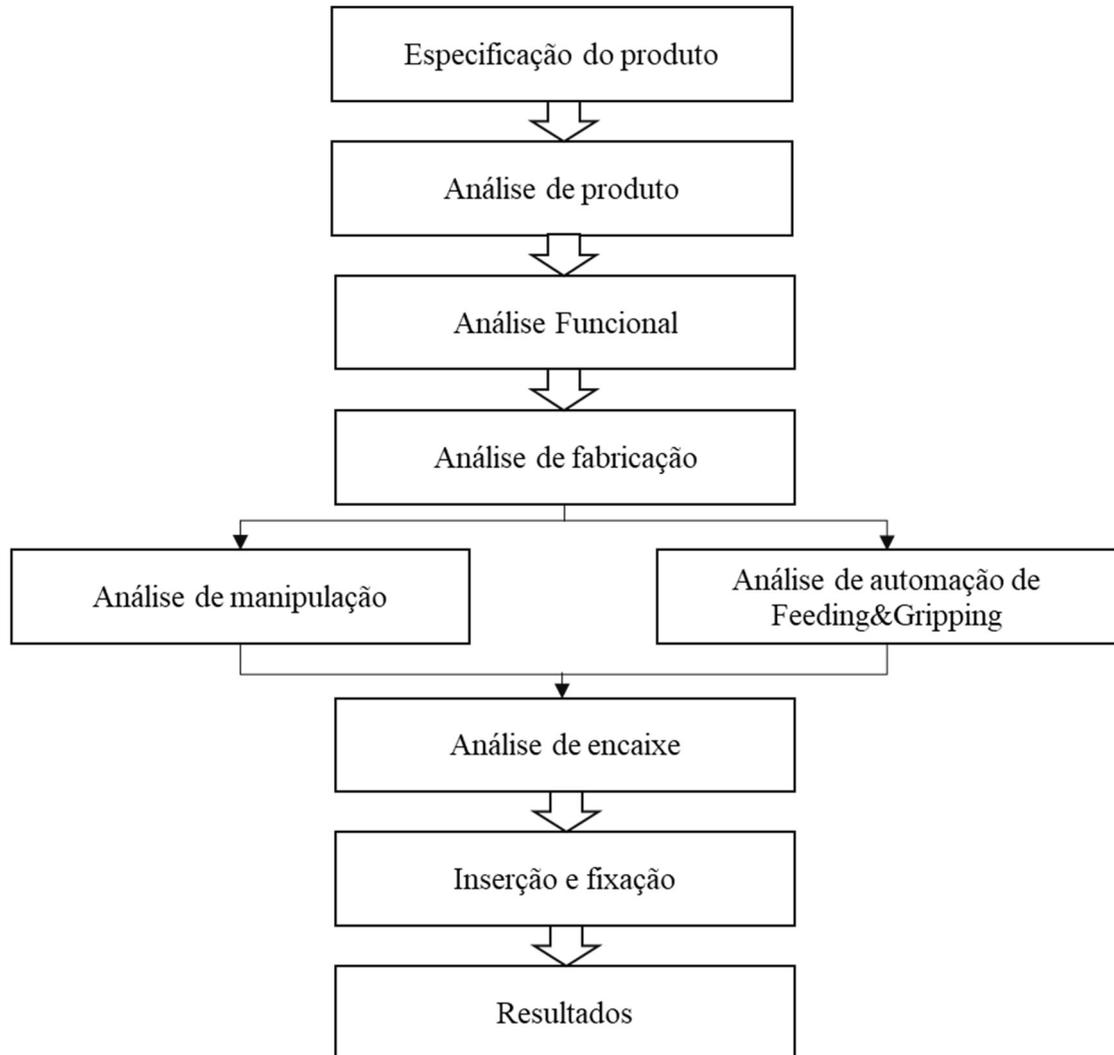
Em resumo, o método de Boothroyd visa reduzir o tempo de montagem, o que, por sua vez, diminui os custos associados. Os tempos de manipulação e inserção são. Embora o método Boothroyd seja eficiente para avaliar o design do produto, ele não pode ser usado para projeto conceitual porque, como afirmado na terceira hipótese, ele só pode ser implementado quando o projetista tiver informações completas sobre as dimensões do produto (Dochibhatla e Bhattacharya, 2017).

2.4.2 Método Lucas

O método de Lucas é o método geralmente usado na fase de pré-projeto. O método requer a conclusão de um formulário chamado formulário de fluxograma de montagem, que resume todos os detalhes técnicos do produto parte por parte. Nesta planilha, vários símbolos são usados para representar a ordem de montagem das peças e as pontuações correspondentes são inseridas dentro desses símbolos (Dochibhatla e Bhattacharya, 2017).

Sugere-se usar o método Lucas no estágio de projeto conceitual, pois ele não requer dimensões para calcular o índice de eficiência e é baseado exclusivamente no design básico do produto.

Figura 11 - Fluxograma do método de Lucas.



FONTE: Dochibhatla e Bhattacharya, 2017

O método é baseado em três análises separadas e sequenciais. Estes são melhor descritos como parte do fluxograma de sequência de montagem:

1. Análise funcional;
2. Análise de Alimentação;
3. Análise de encaixe.

2.4.2.1 Análise funcional

Na análise funcional, os componentes do produto são revisados apenas para sua função. Os componentes são divididos em dois grupos. Partes que pertencem ao Grupo A são aquelas consideradas essenciais para a função do produto; As partes do Grupo B são aquelas

que não são essenciais para a função do produto. As funções do Grupo B incluem fixação, localização, etc (Chan e Salustri, 2005).

A eficiência funcional do design pode ser calculada como:

$$Ed = \frac{A}{(A + B) * 100\%} \quad (6)$$

Onde:

A = número de componentes essenciais;

B = número de componentes não essenciais.

A eficiência de design é usada para pré-selecionar uma alternativa de design antes que mais tempo seja gasto nela. Isso é diferente do método Boothroyd-Dewhurst (que pressupõe que um design já esteja disponível). Esta análise destina-se a reduzir a contagem de peças no produto (Chan e Salustri, 2005). Normalmente, uma eficiência de design de 60% é direcionada para projetos iniciais.

2.4.2.2 Análise de alimentação

Nessa análise, assim como o método de Boothroyd o tempo é levado em consideração. Na análise de alimentação, os problemas associados ao manuseio da peça são pontuados usando uma tabela apropriada. Para cada parte, o índice de alimentação individual é pontuado. Geralmente, o índice de destino de uma parte é 1,5. Se o índice for maior que 1,5, a parte deve ser considerada para o novo design (Chan e Salustri, 2005).

No geral todos os componentes dos produtos devem atender uma taxa de alimentação para que seja satisfatório o método de montagem.

$$\text{Índice de alimentação} = \frac{\text{Índice de alimentação total}}{\text{Número de componentes essenciais}} \quad (7)$$

Onde:

- O índice de alimentação total é a soma de todos os índices de todas as partes;
- O número de componentes essenciais é o valor A da análise funcional.

Uma taxa de alimentação ideal é geralmente considerada como 2,5 (Chan e Salustri, 2005).

2.4.2.3 Análise de encaixe

A análise de ajuste é calculada de forma semelhante à análise de alimentação. Novamente, um índice de ajuste de 1,5 é um valor de meta para cada montagem. No entanto, deve-se notar que geralmente há maior variação nos índices de adaptação do que nos índices de alimentação. Novamente, uma proporção global de 2,5 é desejada (Chan e Salustri, 2005).

$$\text{Índice de adaptação} = \frac{\text{Índice de ajuste total}}{\text{Número de componentes essenciais}} \quad (8)$$

Baseada nas análises realizadas por Lucas, pode-se resumir os parâmetros necessários para a elaboração das análises de eficiência.

Quadro 1 - Parâmetros de análise de manuseio.

| Método Lucas DFA – Manual Handling Analysis | | | |
|--------------------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------|-----|
| Índice de manipulação = A+B+C+D | | | |
| A. Tamanho e Peso da Parte Um dos seguintes | | B. Problemas de manuseio Tudo o que se aplica | |
| Muito pequeno – requer ferramenta | 1,5 | Delicado | 0,4 |
| Conveniente – somente mãos | 1,0 | Flexível | 0,6 |
| Grande e/ou pesado – requer mais de 1 mão | 1,5 | Pegajoso | 0,5 |
| Grande e/ou pesado – requer talha ou 2 pessoas | 3 | Tangível | 0,8 |
| | | Gravemente ninho | 0,7 |
| | | Afiada / abrasiva | 0,3 |
| | | Intocável | 0,5 |
| | | Problema emocionante/escorregadio | 0,2 |
| | | Sem dificuldades de manuseio | 0,0 |
| C. Orientação da parte Um dos seguintes | | D. Orientação Rotacional da Parte Um dos seguintes | |
| Simétrico, sem orientação necessária | 0,0 | Simetria rotacional | 0,0 |
| De ponta a ponta, fácil de ver | 0,1 | Orientação rotacional, fácil de ver | 0,2 |
| De ponta a ponta, não visível | 0,5 | Orientação rotacional, difícil de ver | 0,4 |

FONTE: Chan e Salustri, 2005

Quadro 2 - Parâmetros para a análise de ajuste manual

| Método Lucas DFA – Análise de Ajuste Manual | | | |
|------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------|-----|
| Índice de montagem = A+B+C+D+E+F | | | |
| A. Colocação e Fixação de Peças Um dos seguintes | | D. Acesso e/ou Visão Um dos seguintes | |
| Orientação de auto -retenção | 1,0 | Direto | 0,0 |
| Requer segurando mais 1 dos seguintes | 1,0 | Difícil | 1,5 |
| Auto - seguro (ou seja, snaps) | 1,3 | | |
| Parafusando | 4,0 | | |
| Rebitagem | 4,0 | | |
| Flexão | 4,0 | | |
| B. Direção do Processo Um dos seguintes | | E. Alinhamento Um dos seguintes | |
| Linha reta de cima | 0,0 | Fácil de alinhar | 0,0 |
| Linha reta não de cima | 0,1 | Difícil de alinhar | 0,7 |
| Não é uma linha reta | 1,6 | | |
| C. Inserção Um dos seguintes | | F. Força de Inserção Um dos seguintes | |
| Solteiro | 0,0 | Nenhuma resistência à inserção | 0,0 |
| Múltiplas inserções | 0,7 | Resistência à inserção | 0,6 |
| Inserções múltiplas simultâneas | 1,2 | | |

FONTE: Chan e Salustri, 2005

2.5 Projeto detalhado do trem de pouso principal

Raymer (1989) apresenta três principais configurações de trens de pouso, as quais visualizam-se na Figura 4, suas características podem ser analisadas segundo as descrições a seguir.

- A configuração convencional possui duas rodas principais em frente ao centro de gravidade (cg) da aeronave e uma pequena roda auxiliar ao final da empenagem.
- A configuração triciclo possui duas rodas principais posteriores ao cg da aeronave e uma auxiliar em frente (também chamada de bequilha).

- A configuração bicicleta com outriggers possui duas rodas principais, antes e depois do cg da aeronave, geralmente com 50% do peso em cada roda principal, com pequenas rodas nas asas que previnem a rolagem lateral da aeronave.

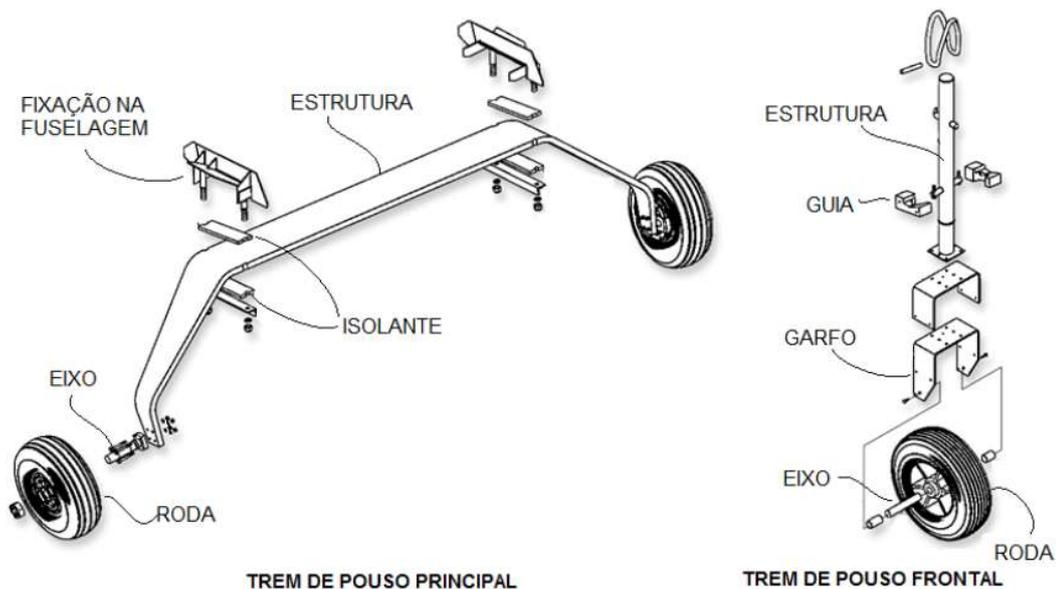
Figura 12 - Configurações do trem de pouso citado por RAYMER (1989), respectivamente.



Fonte: Adaptado de BARROS (2001).

Para critério de exemplificação, na Figura 5 mostra-se as ilustrações dos elementos básicos de um conjunto trem de pouso, com configuração triciclo.

Figura 13 - Vista explodida dos componentes do trem de pouso, configuração triciclo.



Fonte: ABELING (2016)

As partes mais críticas do trem de pouso são a geometria e sua estrutura. Estes são os elementos que mais agregam peso ao conjunto e absorve toda a energia de impacto durante o pouso.

2.5.1 Forças atuantes

RODRIGUES (2011) diz que os principais de tipos de carregamento no trem de pouso são:

- Carregamento estático no solo;
- Carregamento dinâmico no pouso.

As cargas podem ser de tração, compressão, cisalhamento, torção ou flexão.

2.5.2 Fator de carga no solo

De acordo com FAR PART 23 (2002), o fator de carga no solo é diferente do fator de carga no avião, sendo este.

$$n_g = \frac{R_{max}}{V} \quad (1)$$

Onde R_{max} é a força máxima da reação com o chão sobre o trem de pouso e V é o peso da aeronave.

2.5.3 Critérios para cargas de pouso

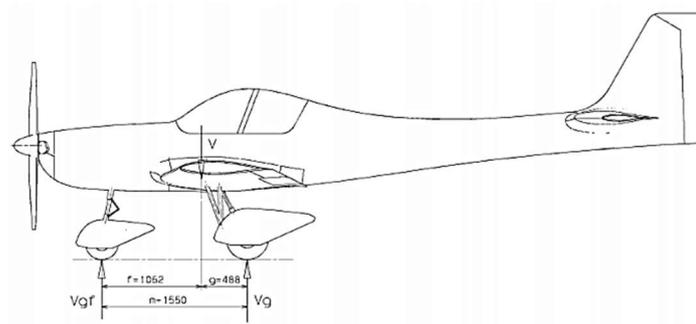
Os critérios para determinação das cargas nos trens de pouso de aeronave não sofreram alterações desde os anos 50, com exceção da inclusão de alguns termos que impõe a determinação das cargas por meio das respostas dinâmicas do trem de pouso. Alguns parágrafos das normas aeronáuticas determinam os critérios a serem usados para a definição das cargas devido ao pouso da aeronave (ISCOLD, 2002).

De acordo com a (FAR PART 23, 2002):

Os parágrafos 479 e 481: A sustentação da aeronave deve ser considerada, sendo, entretanto, sempre menor que o peso da mesma. Os fatores de carga limites correspondentes aos limites de velocidade estabelecidos devem ser comprovados de acordo com os testes definidos nos parágrafos 723. O coeficiente de atrito entre o pneu e o solo deve ser avaliado levando em consideração os efeitos da pressão dos pneus e da velocidade de derrapagem, não necessitando ser maior que 0.8. O método de análise dinâmica da aeronave em condição de pouso deve levar em consideração, no mínimo: i) características dinâmicas do trem de pouso; ii) os efeitos de *spin-up* e *springback*; iii) a resposta de corpo rígido da aeronave e iv) a resposta dinâmica da estrutura da aeronave. Os parágrafos 473: Nenhum fator de carga de inércia usado em propósitos de projeto deve ser menor que 2,67, nem o fator limite de reação do solo deve ser menor que 2,0 utilizando o limite máximo de peso projetado, a menos que esses valores inferiores não serão ultrapassados quando taxiarem em velocidades de até a velocidade de decolagem em terrenos tão agressivo como esperado para serviço (FAR-PART 23, p. 32, grifo nosso).

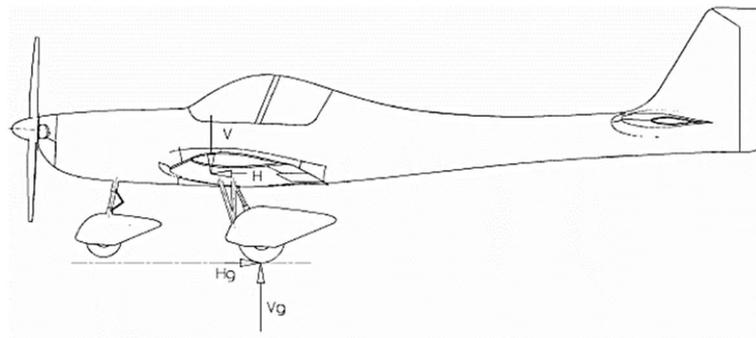
São avaliados: pouso em três rodas, pouso em duas rodas e o pouso em uma única roda do trem de pouso.

Figura 14 - Carga para o pouso em três rodas.



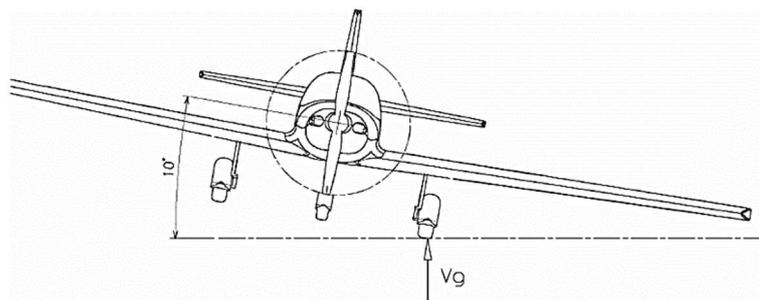
Fonte: RODRIGUES (2011,p,433)

Figura 15 - Carga para o pouso em duas rodas.



Fonte: RODRIGUES (2011, p433)

Figura 16 - Carga para pouso em uma roda.



Fonte: RODRIGUES (2011,p433)

Os parâmetros apresentados nas figuras 6,7 e 8 significam:

V = força peso aplicada no centro de gravidade da aeronave;

V_g = Reação vertical no trem de pouso principal;

V_{gf} = Reação vertical no trem de pouso auxiliar;

H_g = Reação horizontal causada pela inércia rotacional;

m = Distância entre V_g e V_{gf} ;

g = Distância entre V_g e V ;

f = Distância entre V_{gf} e V ;

2.5.4 Drop test

Para validação do componente será executado um teste de queda com o protótipo físico do trem de pouso conforme a norma americana para aeronaves leves, a FAR-PART 23.

Segundo a norma FAR-PART 23:

Se a observância § 23,723 (a) é demonstrado por testes de queda livre, estes testes deve ser feita do avião completo , ou em unidades de roda que consistem pneus e amortecedores, em sua correta relação , de não alturas de queda livre menos do que as determinadas pela seguinte equação:

$$h = 3,6 \left(\frac{W}{S} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

No entanto, a altura de queda livre não pode ser inferior a 9,2 polegadas e não necessita de ser mais de 18,7 polegadas. Se o efeito de levantamento da asa é fornecido para nos testes de queda livre, o mesmo deve ser eliminado conforme a equação:

$$W_e = W \frac{[h + (1 - L)d]}{(h + d)} \quad (3)$$

W_e = o peso eficaz a ser utilizada no teste de queda (lbs.);

h = especificado altura de queda livre (polegadas);

d = deflexão sob impacto do pneu (no pressão de inflação aprovado) mais o

componente vertical da relação de viagens eixo para a massa da gota (polegadas) ;

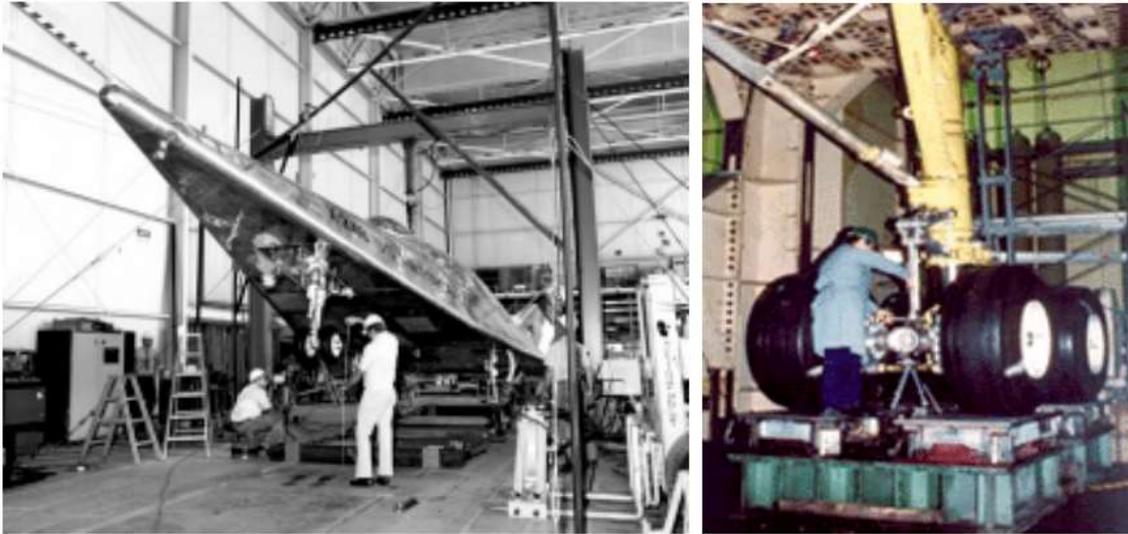
$W = W_M$ para as principais redutores (LBS) , igual ao peso estático naquela unidade com o avião na atitude de nível (com o nariz roda claro no caso do nariz tipo de roda aviões);

$W = W_T$ para engrenagem cauda unidades (lbs.) , Igual ao peso estático sobre a unidade de cauda com o avião na atitude de cauda - para baixo ;

$W = W_N$ para roda de nariz unidades lbs.) , Igual ao componente vertical da reacção estática que existiria na roda do nariz , assumindo que a massa do avião actua em o centro de gravidade e exerce uma força de 1,0 g de queda e 0,33 g para a frente ; e

L = a proporção de ascensor asa assumido para o peso do avião, mas não superior a 0,667 .

Figura 17 - Ensaio de queda livre de trem pouso.

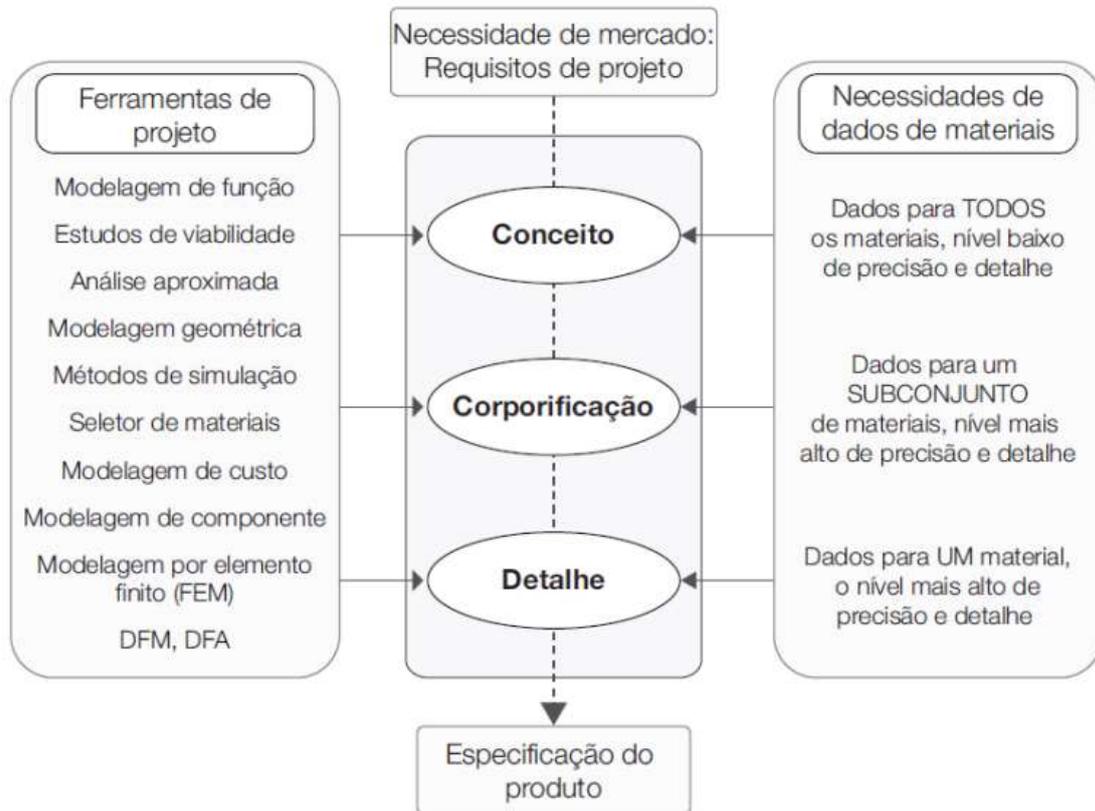


Fonte: ISCOLD (2002,p.160)

2.6 Critério de seleção de materiais

Para Ashby (2005), ferramentas para seleção de materiais exercem um papel considerável em cada etapa do projeto. As ferramentas preparam a modelagem e o aprimoramento de um projeto mecânico a partir delas é possível suavizar os aspectos frequentes de cada estágio. Modeladores de função apresentam fundamentos de funções que são viáveis. Já os Otimizadores de configuração requintam formas. Com os pacotes de modelagem geométrica e de sólidos em três dimensões é possível visualizar e criar arquivos que podem ser usados para sistemas controlados numericamente. A partir da utilização do Software de otimização, DFM, DFA e de estimativa de custo é possível melhorar os aspectos de fabricação. Pacotes de elemento finito (FE) e de dinâmica de fluidos por computador (CFD) tornam as análises mecânicas e térmicas mais precisas até quando a geometria é complicada.

Figura 18 - Fluxograma de um projeto segundo Ashby.



Fonte: ASHBY (2005)

Para Ferrante (2002, p.18) os procedimentos de seleção de materiais obedecem a múltiplos critérios. Critérios estes que considerados individualmente provocam alternativas de escolha bastante simples e lineares, mas o que acontece na prática é que um material não é selecionado a partir do estudo de um único critério de seleção e sim a partir de um conjunto de critérios conflitantes que devem ser satisfeitos ao mesmo tempo.

Na busca de ferramentas que simplifiquem o processo de seleção de materiais, Ashby desenvolveu em 1992 uma metodologia de seleção de materiais. Com esse recurso cada material pode ser especificado por diversos atributos, como por exemplo: densidade, módulo de elasticidade e resistência. Durante a seleção de materiais, é necessário avaliar estes multicritérios que na maioria das vezes são conflitantes, de uma forma a satisfazer todos eles simultaneamente (CRUZ,2018).

Segundo Ferrante (2002, p. 18), dentre os mais representativos critérios de seleção, são apontados :

- Considerações dimensionais;
- Considerações de forma;

- Considerações de peso;
- Considerações de resistência mecânica;
- Resistência ao desgaste;
- Conhecimento das variáveis de operação;
- Facilidade de fabricação;
- Requisitos de durabilidade;
- Número de unidades;
- Disponibilidade de material;
- Custo;
- Existência de especificações e códigos;
- Viabilidade de reciclagem;
- Valor de sucata;
- Grau de normalização;
- Tipo de carregamento.

2.6.1 Materiais utilizados para fabricação do trem de pouso

2.6.1.1 Alumínio

O alumínio é vastamente utilizado na indústria aeronáutica. O material apresenta características como uma alta relação entre peso e resistência, é um metal não magnetizável, e possui uma facilidade de manuseio. Em comparação com as estruturas de aço, as estruturas de alumínio, possuem diminuição no peso de 40% a 70% (ABDO, 1993).

Alumínio e suas ligas são caracterizadas por uma relativamente baixa densidade (2,7 g/cm³ quando comparada com 7,9 g/cm³ para o aço), e uma resistência à corrosão em alguns ambientes, incluindo o ambiente atmosférico. Um fator importante é que o alumínio tem uma elevada resistência a fadiga, no caso de desgaste são conhecidos seus sinais, como corrosão, deformação, e são observados a olho nu, ao contrário de materiais compósitos que necessitam periodicamente de inspeções utilizando ultrassom (CALLISTER, 2008). O alumínio também é empregado na longarina da asa, rebites, fuselagem, revestimento.

2.6.1.2 Compósitos

A constante necessidade de redução de peso em aeronaves e estruturas espaciais tem continuamente impulsionado a tecnologia de processamento de compósitos estruturais. Este aumento de uso está associado à redução de peso, com maiores valores de resistências à fadiga e à corrosão, em relação ao alumínio, facilidade na obtenção de peças com geometrias complexas e flexibilidade de projeto na concepção de estruturas de forma integrada, reduzindo, assim, o número de componentes aero embarcados. Como muitos dos elementos estruturais utilizados no setor aeroespacial apresentam dimensões consideráveis, os materiais compósitos poliméricos representam um caso de particular relevância dentro dos materiais de engenharia não convencionais, especialmente para aplicações estruturais de uso aeronáutico. Desde o advento das fibras de vidro, aramida e carbono, a indústria aeronáutica tem se utilizado dessa tecnologia na fabricação de peças para aeronaves (REZENDE,2007).

Apesar das vantagens que os materiais compósitos apresentam e que motivam a sua utilização na indústria aeroespacial, essa classe de materiais tem como desvantagem, em comparação aos metais, a susceptibilidade aos danos, perdendo muito de sua integridade estrutural quando isso ocorre (REZENDE,2007).

2.7 Critério de falha

Segundo Juvinal (2013, p.135), “A falha de um componente estrutural ocorre por uma combinação das tensões principais, assim, é necessário estabelecer uma teoria de falha para os materiais a fim de prever sua resistência”.

No projeto de uma peça ou máquina deve ser estabelecido uma faixa de operação para que não haja falha pela ação dos carregamentos solicitados. Para tal devemos conhecer os tipos de deformações.

Os materiais dúcteis falham por cisalhamento, e usando essa ideia, Henri Tresca propôs a teoria da tensão de cisalhamento máxima, ou critério de escoamento de Tresca. Essa teoria pode ser usada para prever a tensão de falha de dum material dúctil sujeito a qualquer tipo de carga. A teoria da tensão de cisalhamento máxima afirma que o escoamento do material começa quando a tensão de cisalhamento máxima absoluta no material atinge a tensão de cisalhamento que provoca o escoamento desse mesmo material quando sujeito somente a tensão axial (HIBBELER, 2010).

A teoria da máxima energia de distorção se baseia na circunstância de que todo o material elástico suscetível a determinado estado de tensões sofre transformação de forma e/ou volume. A energia necessária para tal deformação fica acumulada como energia elástica. Os estados de tensão que fornecem pontos na região compreendida pela elipse não ocasionam falhas. As falhas sucederão quando o estado de tensões gerarem um ponto que esteja na linha da elipse ou fora da região contida por ela (HIBBELER, 2010).

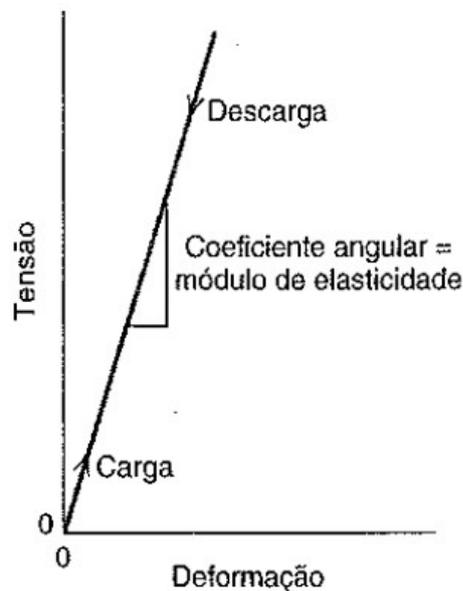
2.7.1 Deformação Elástica

Para CALLISTER (2008), deformação plástica é o processo de deformação no qual a tensão e a deformação são proporcionais.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

A deformação elástica não é permanente, o que significa que aquando a carga aplicada é liberada, a peça retorna à sua forma original. O gráfico a seguir mostra a relação da tensão (ordenada) em função da deformação (abscissa), resulta em uma relação linear.

Figura 19 - Diagrama esquemático tensão-deformação.



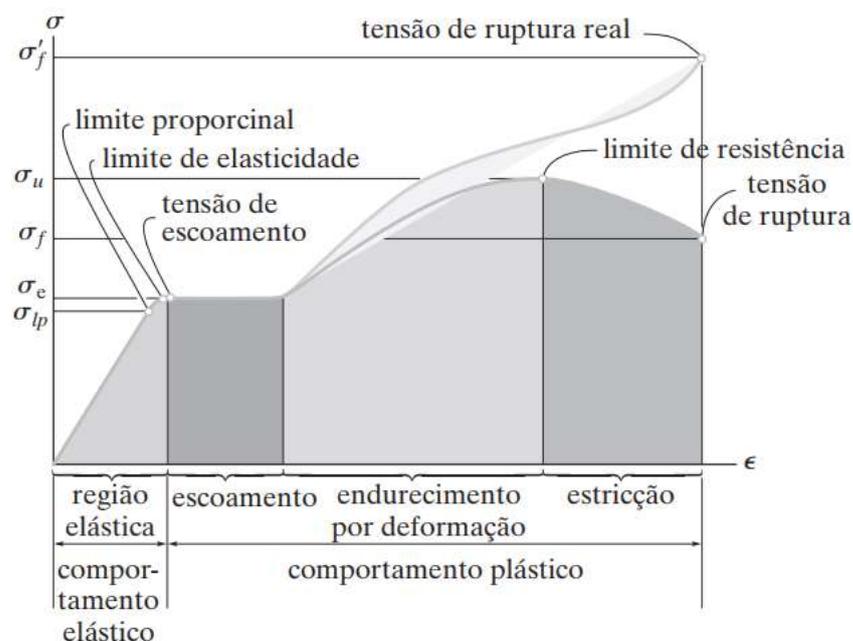
Fonte: CALLSITER (2002)

2.7.2 Deformação plástica

Para CALLISTER (2002), a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste apenas até deformações de aproximadamente 0,005. À medida que o material é deformado além deste ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação, ocorrendo então uma deformação permanente e não recuperável, ou deformação plástica.

A partir de uma perspectiva atômica, a deformação plástica corresponde à quebra de ligações com os átomos vizinhos originais e em seguida formação de novas ligações com novos átomos vizinhos uma vez que um grande número de átomos ou moléculas se move em relação uns aos outros; com a remoção da tensão, eles não retornam às suas posições originais (CALLISTER,2002).

Figura 20 - Diagramas de tensão-deformação convencional e real para um material dúctil.



Fonte: HIBBELER (2010)

O comportamento elástico do material ocorre quando as deformações no corpo de prova estão dentro da primeira região mostrada na figura 13 (HIBBELER, 2010).

2.8 Análise pelo MEF

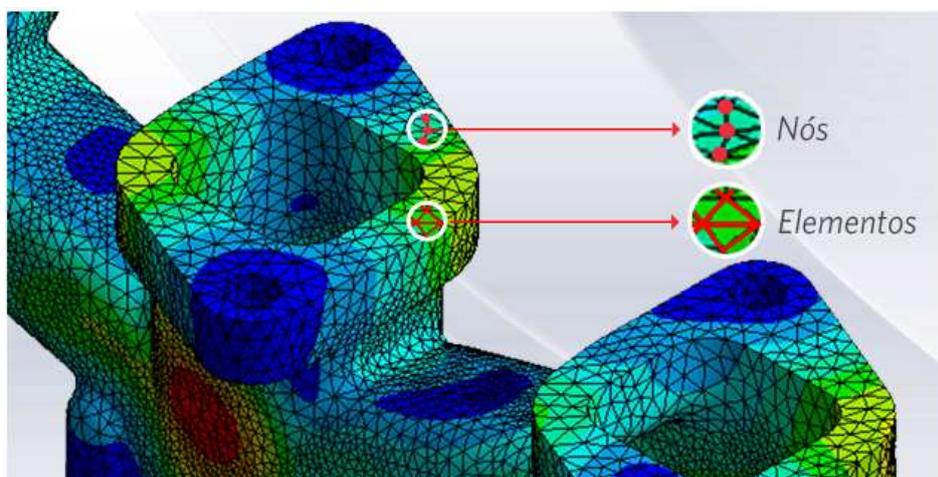
Quando existe a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual proceder-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objetivo de se alcançar uma

solução satisfatória, quer em termos económicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares. As técnicas correspondem à fase de análise do comportamento de uma estrutura cuja geometria, materiais e ações são a priori conhecidos. O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. (AZEVEDO, 2003).

Para Alves Filho (2000), o método de elementos finitos é uma técnica aproximada de cálculo de sistemas contínuo, de maneira que, o corpo contínuo é subdividido em número determinado de partes, conectados entre si por intermediação de pontos discretos, que são denominados nós.

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Referem-se em seguida alguns aspectos que é necessário ter em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura, podendo ela ser análise dinâmica ou estática (AZEVEDO, 2003).

Figura 21- Nós e elementos presentes em uma malha.



Fonte: Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS).

3 METODOLOGIA

3.1 Métodos

Para este trabalho serão abordados os seguintes métodos:

- Estudo de caso: É um tipo de pesquisa qualitativa e/ou quantitativa, compreendido como uma classe de investigação que tem como finalidade o estudo de uma unidade de maneira mais aprofundada (PRODANOV, 2013).
- Quantitativo: este método se caracteriza pelo uso da quantificação, tanto nas categorias de recolhimento de informações, quanto no tratamento dessas através de técnicas estatísticas, a partir das mais simples até as mais complexas. O método quantitativo tem o benefício de ter a finalidade de proporcionar a precisão do trabalho minimizando dessa forma as chances de divergência de resultados (RICHARDSON, 1999)
- Para a elaboração deste tipo de trabalho, o primeiro passo a ser dado é no sentido de identificar as variáveis específicas que possam ser importantes, para assim poder explicar as complexas características de um problema (RICHARDSON, 1999).
- O método dedutivo, de acordo com o entendimento clássico, é o método que parte do geral e, a seguir, desce ao particular. A partir de princípios, leis ou teorias consideradas verdadeiras e indiscutíveis, prediz a ocorrência de casos particulares com base na lógica. “Parte de princípios reconhecidos como verdadeiros e indiscutíveis e possibilita chegar a conclusões de maneira puramente formal, isto é, em virtude unicamente de sua lógica.” (GIL, 2002).

3.2 Técnicas

A principal técnica que será utilizada ao decorrer do trabalho será a técnica do DFMA integrada a ER, onde Souza (2010) acredita que através da aplicação desta técnica, pode-se identificar como os recursos disponíveis na produção podem interferir no sucesso do projeto, buscando analisar detalhes no produto com o objetivo final de aproveitar melhor os recursos industriais da empresa, sempre mantendo o atendimento às necessidades dos clientes, através da simplificação nos processos de fabricação e montagem e da redução de custos

No decorrer do projeto serão abordadas técnicas de buscas de outras referências já existentes para elaboração do trabalho, como artigos em periódicos nacionais e internacionais e livros já publicados, as monografias, dissertações e teses constituem excelentes fontes de

consulta. Revisão de literatura difere-se de uma coletânea de resumos ou uma “colcha de retalhos” de citações. Destacamos que a finalidade da pesquisa científica não é apenas um relatório ou uma descrição de fatos levantados empiricamente, mas o desenvolvimento de um caráter interpretativo no que se refere aos dados obtidos. Para tal, é imprescindível correlacionar a pesquisa com o universo teórico, optando por um modelo que sirva de embasamento à interpretação do significado dos dados e fatos colhidos ou levantados. Nesse sentido, todo projeto de pesquisa deve conter as premissas ou os pressupostos teóricos sobre os quais o pesquisador fundamentará sua interpretação (PRODANOV, 2013).

3.3 Procedimentos

Foi realizado o estudo bibliográfico de trabalhos similares ao assunto para elaboração do reprojeto do trem de pouso, a próxima etapa é o projeto conceitual que contará com o apoio da ER em que são definidas as principais características com base nas etapas de confecção de um produto, os requisitos do projeto, a missão, algumas dimensões, configurações dos componentes.

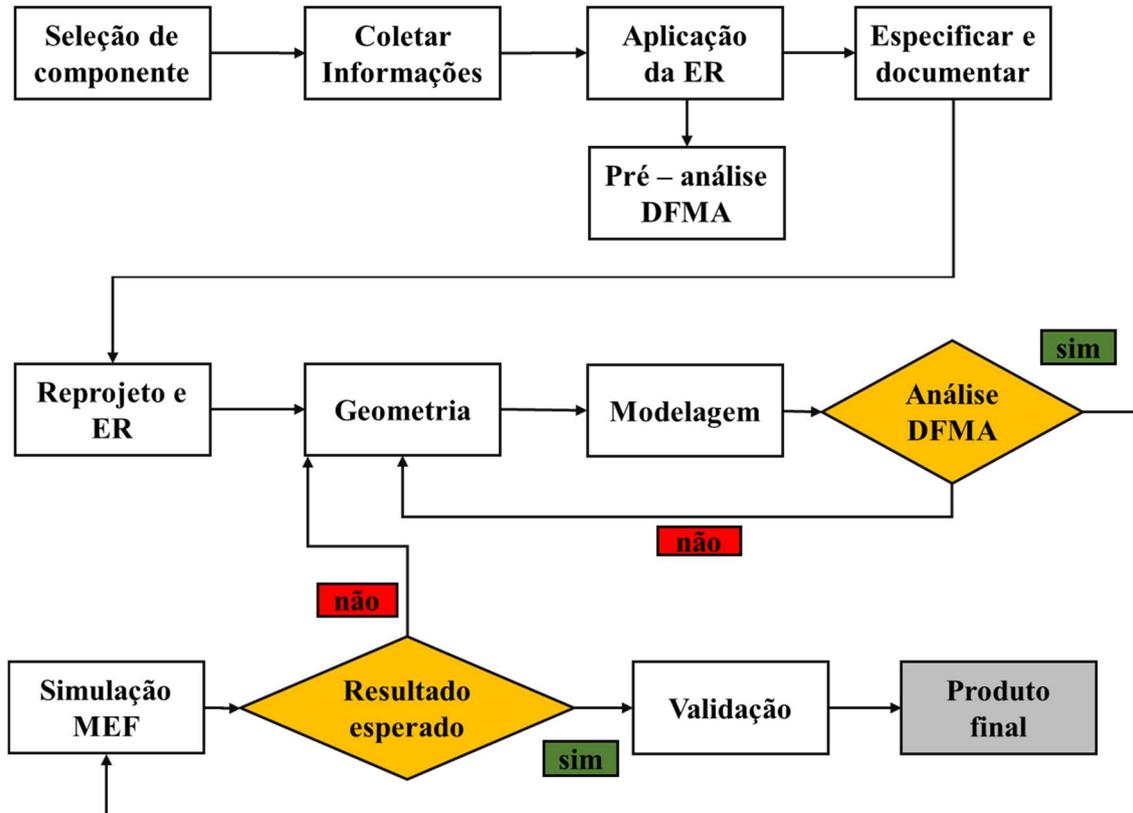
O trabalho contou com a realização de uma avaliação do projeto atual da aeronave através do método de engenharia reversa (ER), que possibilitará encontrar possíveis falhas e oportunidades que através do método DFMA possam ser sanadas e melhoradas, visando otimizar a fabricação, montagem e peso da aeronave. Será abordado a utilização dos métodos integrados entre DFMA e ER. Onde será utilizado o método de Lucas para avaliar o trem de pouso e fundamentar um novo conceito para reformular o projeto atual.

A geometria do projeto foi redefinida conforme a avaliação realizada utilizando o método de Lucas, visando melhorar a montagem e manufatura. O material do trem de pouso atual não sofrerá grandes alterações, já que a finalidade do trabalho é aperfeiçoar os critérios de montagem e manufatura.

Validada a nova geometria por meio das ferramentas do DFMA, o projeto passou por análises utilizando o MEF através de simulação computacional, validando o projeto do novo trem pouso, caso esteja conforme, o mesmo está apto para ser utilizado na aeronave.

Para mostrar de forma descomplicada, a sequência operacional do desenvolvimento do estudo foi resumida em um fluxograma, no qual estão contidas todas as etapas para análise de um produto já existente e seu reprojeto, com o objetivo de melhorar suas características de montagem.

Figura 22 - Fluxograma do procedimento do projeto



FONTE: Autor.

4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Seleção do componente

No início de cada período de competição são realizadas algumas etapas para a definição de como será a aeronave projetada. Dentre essas etapas constam:

- Projeto conceitual: onde são determinados os parâmetros visados para a competição desde a escolha se a aeronave será de fácil construção ou não, até pré determinações de orçamentos base históricos dos anos anteriores;
- Projeto Preliminar: onde é determinado o que será utilizado durante o período de elaboração do projeto teórico e físico;
- Projeto detalhado: onde é realizado o projeto, desde sua elaboração teórica até a confecção da aeronave, assim como sua montagem.

A aeronave da equipe Urutau AeroDesign usada para competição SAE Brasil Aerodesign no ano de 2018 é composta pelos seguintes componentes principais, como pode ser visto na figura 25 e ainda mais detalhado na figura 26:

- ❖ Fuselagem;
- ❖ Tubo de cauda;
- ❖ Empenagens;
- ❖ Asa;
- ❖ Conjunto trem de pouso.

Figura 23 - Aeronave utilizada na competição 2018



Quadro 3 - Principais componentes da aeronave.

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Conjunto traseiro da fuselagem – utilizado para fixação da asa, trem de pouso principal e conjunto da cauda.</p> |  |
| <p>Conjunto dianteiro da fuselagem – utilizado para fixação do grupo motopropulsor.</p> |  |
| <p>Asa – principal superfície sustentadora da aeronave.</p> |  |
| <p>Conjunto da cauda – tubo de cauda + empenagem horizontal + empenagem vertical.</p> |  |
| <p>Trem de pouso principal – utilizado para o deslocamento da aeronave em solo (aterrisagem e/ou decolagem).</p> |  |

FONTE: URUTAU AERODESIGN

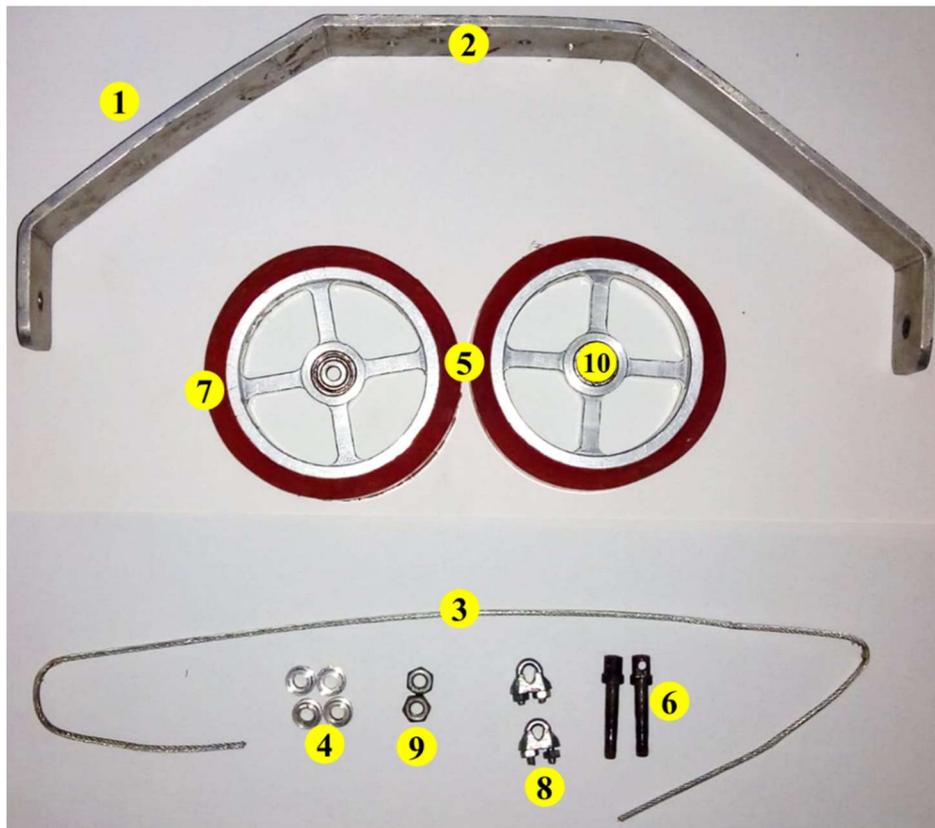
Observando o período de montagem antecedendo a competição, verificou-se que o trem de pouso principal apresentava grande dificuldade para ser montado e fixado na aeronave, então foi realizada uma análise através da ER e com o uso das técnicas do DFMA para verificar qual a situação atual da eficiência de montagem do trem de pouso.

4.2 Aplicação da ER e Pré – análise DFMA

Para avaliar as condições atuais do trem de pouso foi necessário a desmontagem do mesmo para coletar informações a respeito das peças, verificar a quantidade de itens e assim aplicar o método DFMA de Lucas para a avaliação inicial. O trem de pouso foi desmontado e suas partes foram enumeradas para iniciar o processo de análise.

- | | |
|-----------------------|-----------------------------|
| 1. Chapa metálica | 6. Parafuso fixador do cabo |
| 2. Parafusos da chapa | 7. Revestimento roda |
| 3. Cabo de aço | 8. Clips para cabo |
| 4. Buchas | 9. Porcas |
| 5. Rodas | 10. Rolamento |

Figura 24 - Classificação dos itens do trem de pouso principal.



FONTE: Autor

4.2.1 Análise funcional

Conforme Chan e Salustri (2005), foi realizado a avaliação do itens essenciais (A), ou seja, aqueles itens que são de extrema importância para o funcionamento do produto e também dos itens não essenciais (B), aqueles que mesmo com a ausência as funções do produto podem ser realizadas normalmente. Sendo esta classificação a seguinte:

- Essenciais (A) : chapa metálica, rodas, buchas;
- Não essenciais (B) : parafusos da chapa, cabo de aço, parafuso fixador do cabo, revestimento da roda, clips para cabo, rolamento e porcas.

Resultando em dados:

A = 3 itens essenciais;

B = 7 não essenciais.

Com a obtenção dessas duas variáveis é possível realizar a análise do índice de eficiência. Essa é a primeira análise feita antes do planejamento da alternativa principal do projeto e de uma quantidade considerável de tempo gasto nela. O limiar para um design inicial decente é de cerca de 60% para projetos iniciais e de 50% para reprojeto. Se a eficiência do design cair menos de 60%, o designer deve verificar o design e fazer esforços para reduzir o número de peças não funcionais, como os parafusos e outros elementos de fixação.

O número de partes funcionais e não funcionais neste estudo de caso foi de 20 não funcionais e 5 funcionais. [2] determina que o índice de eficiência do projeto do trem de pouso atual é de 25%. Como o índice de eficiência é menor que o limite de 60%, não é aceitável, sendo necessário a eliminação de algumas peças, até atingir a eficiência sugerida.

Tabela 1 - Análise funcional do trem de pouso.

| N | Parte | Número de partes (Np) | Partes mínimas teóricas |
|-----------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | Chapa metálica | 1 | 1 |
| 2 | Parafusos da chapa | 2 | 0 |
| 3 | Cabo de aço | 1 | 0 |
| 4 | Buchas | 4 | 2 |
| 5 | Rodas | 2 | 2 |
| 6 | Parafuso fixador do cabo | 2 | 0 |
| 7 | Revestimento roda | 2 | 0 |
| 8 | Clips para cabo | 2 | 0 |
| 9 | Porcas | 2 | 0 |
| 10 | Rolamentos | 2 | 0 |
| <i>Total</i> | | 20 | 5 |
| <i>Projeto para métrica de montagem</i> | | | 25% |
| <i>Metas</i> | | | >60% |

FONTE: Autor

4.2.2 Análise de alimentação

Conforme o método de Lucas, o índice ideal necessário para uma peça é 1,5 e o valor limite é 2,5. O resultado dessa análise é o índice de alimentação (geralmente é tratado como índice de manipulação no caso de montagem manual). O índice de alimentação de um projeto não deve exceder 2,5 e, se o fizer, o projeto deve ser revisado.

Os valores para A, B, C e D são inseridos para cada parte, conforme mostrado no quadro 1. Esses valores são somados para cada parte e, finalmente, o índice de alimentação de cada parte é adicionado para calcular o índice de alimentação total. Exemplificando o método a seguir deve explicar o método para preencher a tabela de índices de alimentação dos parafusos da chapa do trem de pouso.

Um valor de 1,5 foi escolhido para o parâmetro 'A' porque os parafusos são itens pequenos e necessitam de ferramentas para sua fixação na chapa. Como os parafusos são pequenos/delicados e difícil de manusear, as pontuações correspondentes para delicado e problema escorregadio das tabelas de Lucas foram somadas - 0,4 se a peça for delicada e 0,2 se a peça tiver problema de escorregadio. Como os parafusos possuem orientação simples de ponta a ponta, C = 0,1. Por fim, um valor de 0,2 para o parâmetro D foi escolhido porque os parafusos

podem ser facilmente orientados com base na simetria de ponta a ponta; isto é, é fácil identificar simetria de ponta a ponta.

Tabela 2 - Resultado da análise de manuseio do trem de pouso

| N | PARTE | A | B | C | D | TOTAL (A+B+C+D) |
|---------------------------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------------------------|
| 1 | Chapa metálica | 1,0 | 0,6 | 0,1 | 0,0 | 1,7 |
| 2 | Parafusos de fixação da chapa | 1,5 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 2,4 |
| 3 | Cabo de aço | 1,0 | 0,6 | 0,1 | 0,0 | 1,7 |
| 4 | Buchas | 1,0 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 2,5 |
| 5 | Rodas | 1,0 | 0,4 | 0,1 | 0,2 | 1,7 |
| 6 | Parafusos de fixação do cabo | 1,5 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 2,4 |
| 7 | Revestimento da roda | 1,0 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 3,0 |
| 8 | Clips para cabo de aço | 1,0 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 1,9 |
| 9 | Porcas | 1 | 0,2 | 0,1 | 0 | 1,3 |
| 10 | Rolamentos | 1 | 0,2 | 0,1 | 0 | 1,3 |
| TOTAL | | | | | | 19,9 |
| Taxa de alimentação real | | | | | | 3,98 |
| Taxa de alimentação ideal | | | | | | < 2,5 |

FONTE: Autor

Aplicando-se os valores correspondentes das variáveis em [7], obtém-se um índice de alimentação de 3,98. Como o índice de alimentação é maior que 2,5, limite máximo, o projeto atual não pode ser considerado aceitável, significando que os itens que fazem parte para a montagem do trem de pouso não são totalmente adequados para o manuseio, sendo necessário o reprojeito deste.

4.2.3 Análise de montagem

O índice de adaptação indica a situação de inserção de um item para a montagem do componente, podendo ser de fácil ou difícil inserção. Se o número de peças não essenciais em um projeto for maior, o índice de alimentação excederia o limite porque parafusos, rebites, elementos de fixação em geral, são difíceis de inserir. Portanto, os parâmetros A, B, C, D, E e F (Quadro 2) são diferentes dos da análise de alimentação.

Analisando um dos os parafusos da chapa, estes necessitam serem parafusados e há necessidade que seja sustentado, logo, $A = 6,0$. Como os parafusos devem ser inseridos em linha reta segurando, $B = 0,0$. Os parafusos são inseridos individualmente, então $C = 0,0$. Como o acesso aos parafusos não é restrito, $D = 0,0$. $E = 0,0$ porque, conforme o projeto, não há dificuldade em alinhar os parafusos. Por fim, $F = 0,6$ devido a resistência dos parafusos à inserção.

Substituindo valores encontrados, obtém-se um índice de adaptação de aproximadamente 12,78. O índice de adaptação para o design excede em muito o valor limite de 2,5. É necessário que sejam eliminadas as partes não essenciais. A partir do projeto atual, deve se reprojetoado utilizando artifícios para redesenhar o componente e estabelecer novos índices até alcançar valores satisfatórios, como o índice de adaptação.

Tabela 3 - Resultado da análise de montagem do trem de pouso.

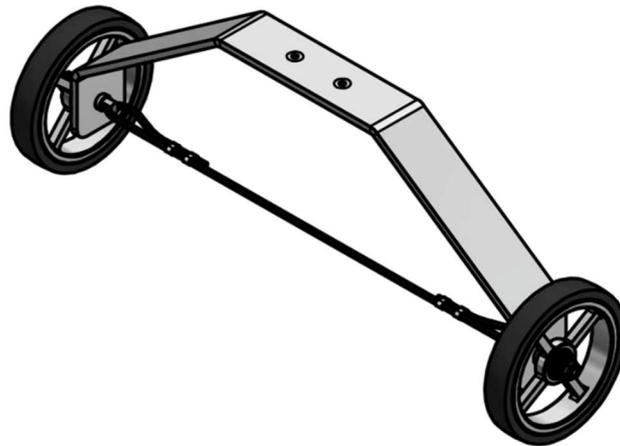
| N | PARTE | A | B | C | D | E | F | TOTAL (A+B+C+D+E+F) |
|-------------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------------------|
| 1 | Chapa metálica | 6 | 1,6 | 0,7 | 0 | 0 | 0 | 8,3 |
| 2 | Parafusos da chapa | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,6 | 6,6 |
| 3 | Cabo de aço | 3,3 | 0,1 | 0 | 0 | 0,7 | 0 | 4,1 |
| 4 | Buchas | 3,3 | 0,1 | 1,2 | 0 | 0,7 | 0 | 5,3 |
| 5 | Rodas | 6 | 0,1 | 0 | 0 | 0,7 | 0 | 6,8 |
| 6 | Parafuso fixador do cabo | 6 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6,1 |
| 7 | Revestimento roda | 6 | 0,1 | 0 | 0 | 0,7 | 0,6 | 7,4 |
| 8 | Clips para cabo | 6 | 1,6 | 1,2 | 1,5 | 0,7 | 0,6 | 11,6 |
| 9 | Porcas | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 10 | Rolamentos | 1 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0,6 | 1,7 |
| TOTAL | | | | | | | | 63,9 |
| Taxa de adaptação real | | | | | | | | 12,78 |
| Taxa de adaptação ideal | | | | | | | | <2,5 |

FONTE: Autor

4.3 Especificar, documentar e reprojetoar utilizando a engenharia reversa

Afim de obter um componente mais funcional, eficiente e com facilidade de montagem, foi realizado, com base nos dados, um levantamento do que precisava ser melhorado no trem de pouso atual. Para isso foi necessário utilizar o desenho do componente e verificar os itens que seriam eliminados pois não eram essenciais para o projeto conforme a análise preliminar realizada com a utilização do método de Lucas.

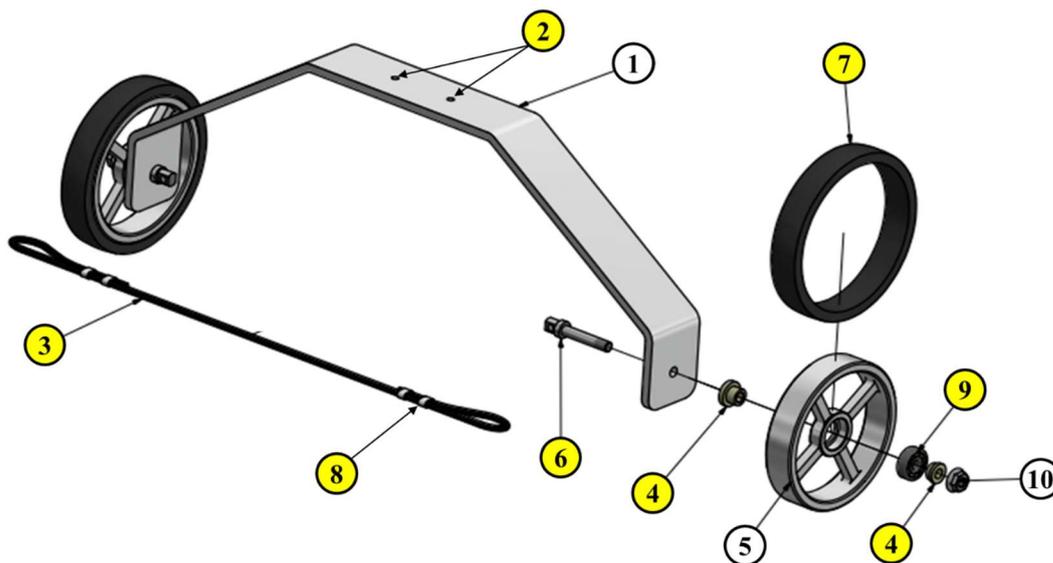
Figura 25 - Trem de pouso atual



FONTE: URUTAU AeroDesign

O trem de pouso em estudo, atualmente utilizado para as análises com os critérios do método DFMA de Lucas está identificado na figura 26. Para ação da ER, foi buscado o projeto deste, acessado e obtida uma vista explodida do mesmo para encontrar quase os itens que poderiam ser modificados eficientemente com objetivo de reprojeta-lo corrigindo os problemas atuais. A vista explodida do projeto com os itens identificados está localizada logo abaixo.

Figura 26 - Seleção para remoção de itens conforme análise.

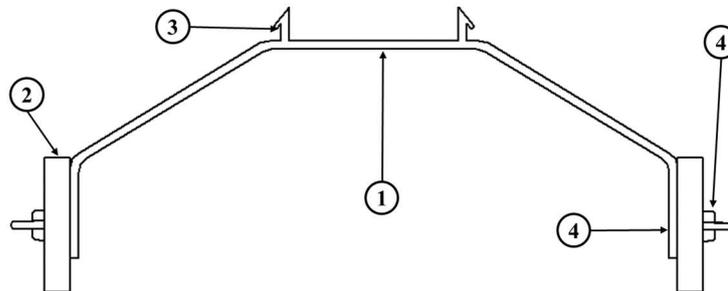


FONTE: URUTAU AeroDesign

Os itens selecionados na figura 26, são itens que de acordo com Chan e Salustri (2005) e Boothroy, não são essenciais para o projeto. Dessa forma foi realizado um esboço do que seria

um trem de pouso que atenderia os critérios do método Lucas em relação aos itens essenciais e não essenciais, sendo este identificado na figura 27.

Figura 27 - Esboço do novo trem de pouso.



FONTE: Autor

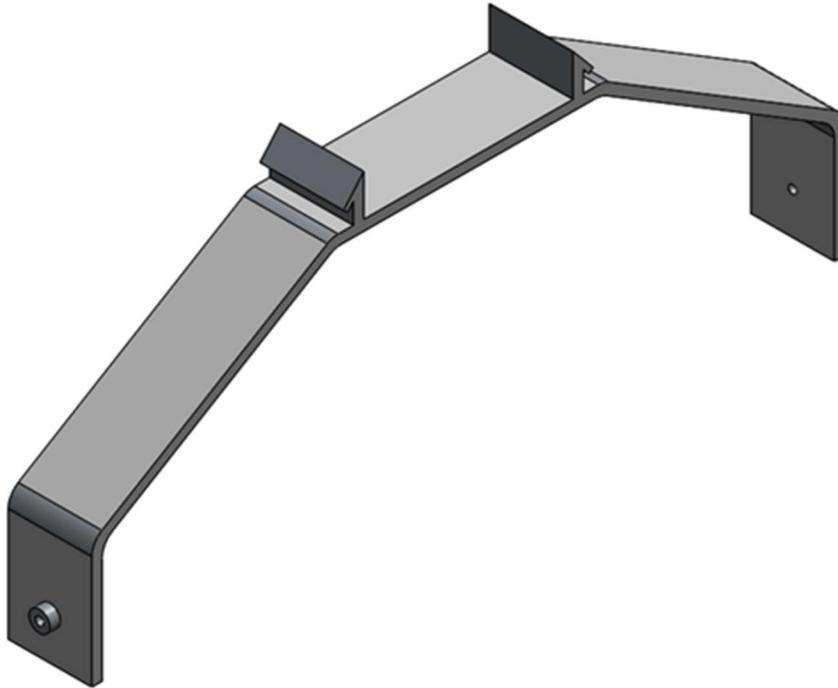
O esboço do novo trem de pouso, ou seja, o trem de pouso conceitual foi determinado com as exclusões e/ou alterações de componentes, como pode ser visto na figura 27. Analisando o novo esboço é possível verificar que a quantidade de itens que o compõem reduziram drasticamente, que é um dos objetivos do método Lucas, sendo para este novo esboço de trem de pouso necessário a modelagem do mesmo no software CAD (SolidWorks) para poder verificar a possibilidade de confecção e então a nova análise utilizando os parâmetros do DFMA.

4.4 Geometria e modelagem

Buscando atender o esboço idealizado no tópico anterior, a geometria do trem de pouso conceitual deve minimizar a complexidade do que é atualmente. O modelo utilizado atualmente como já foi visto, apresenta uma baixa eficiência de montagem, para a nova geometria está critério será levado em consideração, sua estrutura será dividida em: chapa principal com conexão snap, roda e eixo

Chapa principal: elemento principal da estrutura, que tem forma de arco possibilitando uma maior deflexão, gerando assim uma maior absorção da energia no impacto.

Figura 28 - Chapa principal



FONTE: Autor

Roda: elemento que tem contato com o solo durante a decolagem e pouso, devido ao atrito com o solo é recomendado que haja uma geometria e estrutura suficientemente resistente ao impacto.

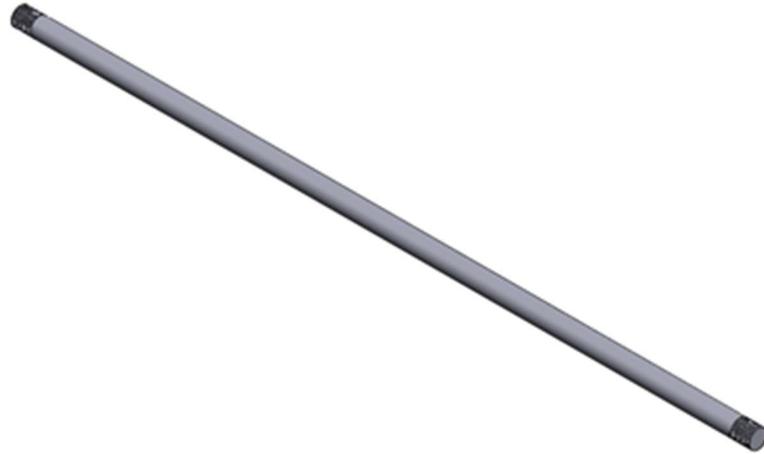
Figura 29 - Roda



FONTE: Autor

Eixo: elemento que tem como função a fixação das rodas e suportar seu carregamento.

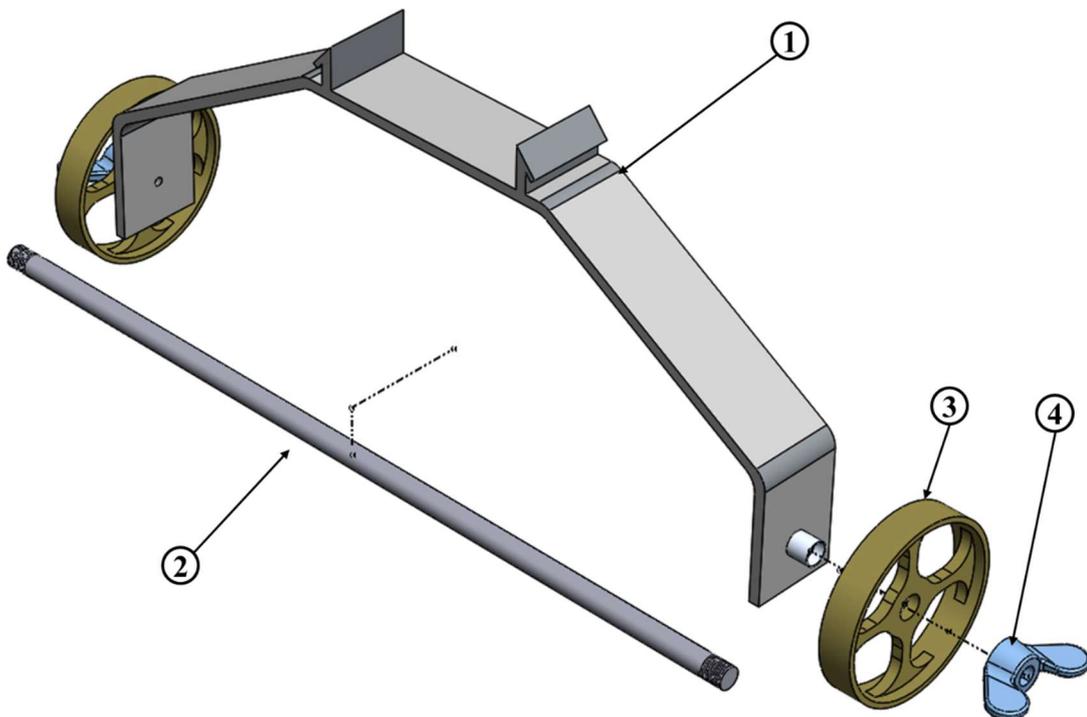
Figura 30 - Eixo de conexão



FONTE: Autor

Trem de pouso conceitual: componente idealizado segundo a prévia feita com a engenharia para modificações e melhorias.

Figura 31 - trem de pouso conceitual



FONTE: Autor

4.5 Análise DFMA

Estabelecida a nova geometria, a etapa seguinte é a análise do trem de pouso conceitual, visando alcançar resultados dentro dos parâmetros do método Lucas, tanto em eficiência como nas taxas de montagem e alimentação.

4.5.1 Análise funcional

Para a nova geometria será realizada a avaliação do itens assim como na pré análise, para definir como os itens estão classificados, se são itens essenciais (A), ou seja, aqueles itens que são de extrema importância para o funcionamento do produto e também dos itens não essenciais (B), aqueles que mesmo com a ausência as funções do produto podem ser realizadas normalmente. Sendo a classificação para o trem de pouso conceitual, a seguinte:

- Essenciais (A) : chapa metálica, rodas, eixo e porcas.
- Não essenciais (B) : entre os itens selecionados não nenhum com esta classificação.

Resultando em dados:

A = 4 itens essenciais;

B = 0 não essenciais.

A partir das variáveis obtidas, será realizada a análise de índice de eficiência, e já que houve uma redução no número de peças não essenciais, este índice tende a aumentar. Como já especificado, o limiar para um design inicial decente é de cerca de 60% para projetos iniciais e de 50% para reprojeto. Se a eficiência do design cair menos de 60%, o designer deve verificar o design e fazer esforços para reduzir o número de peças não funcionais, como os parafusos e outros elementos de fixação.

O índice obtido no trem de pouso atual foi de 31% como já visto antes na avaliação do DFMA integrado a engenharia reversa, com o número de partes funcionais e não funcionais sendo de 8 cada uma. Gastou-se uma quantidade considerável de tempo para definir uma nova geometria para modelo a ser analisado. O objetivo principal da nova geometria era aumentar a eficiência do atual, esta além de aumentar a atual eficiência, também atendeu aos critérios de projeto inicial, acima de 60%, com uma eficiência funcional de 100%, pois o projeto foi realizado segundo as premissas do DFMS.

Tabela 4 - Análise funcional do trem de pouso conceitual.

| N | Parte | Número de partes (Np) | Partes mínimas teóricas |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | Chapa principal | 1 | 1 |
| 2 | Tubo - eixo | 1 | 1 |
| 3 | Rodas | 2 | 2 |
| 4 | Porcas | 2 | 0 |
| <i>Total</i> | | 6 | 4 |
| <i>Projeto para métrica de montagem</i> | | | 67% |
| <i>Metas</i> | | | >60% |

FONTE: Autor

4.5.2 Análise de alimentação

Cumprindo os critérios de eficiência funciona, a próxima análise é em relação a alimentação e montagem. Como já foi estabelecido em outro tópico o índice ideal necessário para uma peça é 1,5 e o valor limite é 2,5. O resultado dessa análise é o índice de alimentação (geralmente é tratado como índice de manipulação no caso de montagem manual). O índice de alimentação de um projeto não deve exceder 2,5 e, se o fizer, o projeto deve ser revisado. O índice do trem de pouso atual é de 3,98, fugindo dos parâmetros ideais estabelecidos, logo um dos objetivos do projeto do trem de pouso conceitual é obter melhor índice que o atual e dentro dos parâmetros ideais estabelecidos pelo método Lucas.

A soma dos valores estabelecidos em A, B, C e D deve ser o menor possível para que o índice de alimentação de cada parte seja pequeno e assim o valor total final também o seja. Demonstrando novamente o método, a seguir será como foi definido os parâmetros para a chapa principal do trem de pouso conceitual.

O valor de 1,0 foi escolhido para o parâmetro 'A' da chapa principal porque é um item que não necessita de ferramentas a parte, sendo necessário somente as mãos para o manuseio. Para o parâmetro B, foi definido um de valor de 0,6, pois a chapa principal é um item grande e flexível para poder corresponder as funções e absorver melhor os impactos causados no trem de pouso. No parâmetro C, o valor de 0,1 deve -se ao fato de ser um item simétrico visto de cima, logo não há problemas na orientação, sendo fácil de ver e conseqüentemente sem necessidade de dificuldades rotacionais, levando D ao valor de 0,0.

Realizada a análise foi possível verificar os resultados do índice de alimentação e manuseio, que anteriormente era de 3,46, sendo que o máximo permitido é de 2,5, ou seja, estava fora do valor limite, sendo necessário reprojeter para corrigir. Feito o reprojeto, o novo valor do índice de alimentação diminuiu em relação ao anterior, sendo agora de 1,10, não somente reduzindo o atual mas também atendendo aos critérios definidos no método de Lucas.

Tabela 5 - Resultado da análise de manuseio do trem de pouso conceitual

| N | PARTE | A | B | C | D | TOTAL (A+B+C+D) |
|---------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|------------------------|
| 1 | Chapa principal | 1 | 0,6 | 0,1 | 0 | 1,7 |
| 2 | Tubo - eixo | 1 | 0,6 | 0,1 | 0 | 1,7 |
| 3 | Rodas | 1 | 0,4 | 0,1 | 0 | 1,5 |
| 4 | Porcas | 1 | 0,4 | 0,1 | 0,2 | 1,7 |
| TOTAL | | | | | | 6,6 |
| Taxa de alimentação | | | | | | 1,1 |

Taxa de alimentação ideal < 2,5

FONTE: Autor

4.5.3 Análise de montagem

O reprojeto do trem de pouso foi realizado com a finalidade de aumentar o índice de adaptação, para isso foi necessário a eliminação de alguns itens que o compõem, sendo estes principalmente aqueles que não eram essenciais para o funcionamento do trem de pouso e alterados outros itens para melhorar a eficiência de montagem. NO reprojeto, foi evitado ao máximo peças de fixação pequenas, como parafusos e rebites, para diminuir a dificuldade de inserção.

Analisando novamente a chapa principal do trem de pouso conceitual, agora para cálculo da taxa de adaptação, esta precisa ser segurada para fixá-la na aeronave então é atribuído ao parâmetro um valor de 2,0, porém a mesma não necessita mais ser parafusada ou rebitada, utilizando somente fixação snap como pode ser vista no projeto, fixação que pode ser vista como uma inovação que além de minimizar a quantidade de itens de fixação, também ajuda na troca rápida do item, sendo então atribuído mais 1,3 ao parâmetro, totalizando então para A o total de 3,3. Como a fixação da chapa agora será por fixação snap, esta deve ser fixada em linha reta para não prejudicar o método, logo o parâmetro B é atribuído um valor de 0,1. Por ser o principal item do trem de pouso conceitual, a chapa principal recebe todos os demais itens, logo

sofre múltiplas inserções, sendo atribuído então para C, o valor de 0,7. Para os demais parâmetros são atribuídos o valor 0,0, pois chapa principal foi reprojeta para ser facilmente acessada, com rápido alinhamento, dos itens e na fixação na aeronave, e não apresentar nenhuma resistência durante as inserções e fixações.

Anteriormente o valor encontrado para índice de adaptação era muito elevado, que significava que havia grandes dificuldades não montagem do componente, o que refletia a realidade. O índice obtido para o trem de pouso atual foi de 11,24, como já estabelecido em outro tópico, após o reprojeto, este índice reduziu para 2,05 para o trem de pouso conceitual, sendo excelente o rendimento do reprojeto, pois não somente reduziu o valor em relação ao projeto anterior mas também passou a tender os critérios determinados no método Lucas, que indica para não ultrapassar o valor de limite de 2,5, sendo então o resultado satisfatório para o reprojeto.

Tabela 6 - Resultado da análise de montagem do trem de pouso conceitual.

| N | PARTE | A | B | C | D | E | F | TOTAL (A+B+C+D+E+F) |
|-------------------|-----------------|-----|-----|-----|---|---|---|------------------------|
| 1 | Chapa principal | 3,3 | 0,1 | 0,7 | 0 | 0 | 0 | 4,1 |
| 2 | Tubo - eixo | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | Rodas | 6 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6,1 |
| 4 | Porcas | 1 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,1 |
| TOTAL | | | | | | | | 12,3 |
| Taxa de adaptação | | | | | | | | 2,05 |

< 2,5

FONTE: Autor

4.6 Simulação utilizando o método de elementos finitos

Para realizar o estudo de tensões através do método de elementos finitos (MEF) é necessário primeiramente definir alguns critérios, sendo eles:

1. Definição de geometria;
2. Definição de material;
3. Atribuição de cargas;
4. Simulação.

4.6.1 Definição de geometria

Buscando minimizar as dificuldades de montagem, aumentando a eficiência da mesma, as peças foram projetadas de forma que na montagem final haja maior facilidade, para isso serão utilizadas as peças já definidas utilizando o método aplicado no trabalho no tópico 4.4.

4.6.2 Definição de material

Para definição dos materiais, foram utilizados aqueles que mais são usados por equipes participantes no *aerodesign* de acordo com o levantamento realizado de trabalhos similares relacionados a construção de um trem de pouso, sendo eles:

- Nylon;
- Poliacetal;
- Alumínio;
- Fibra de carbono + epóxi;

Para a definir qual desses materiais escolher para cada componente, visto que cada um tem sua função específica, alguns critérios foram seguidos, como:

- ❖ Apresentar baixo peso;
- ❖ Boa rigidez;
- ❖ Resistência ao desgaste;
- ❖ Facilidade de manufatura.

Buscando a comparação desses critérios, foi elaborada um quadro comparativo com os materiais e suas propriedades.

Quadro 4 - Materiais utilizados

| Propriedades | PA TIPO 6 | Nylon 6/10 | Al 6061 -T6 | Fibra de carbono + resina | Unidade |
|------------------------------|--------------|---------------|----------------|------------------------------|-------------------|
| Módulo elástico (GPa) | 2,6 | 8,3 | 69,0 | 70,0 | N/m ² |
| Coefficiente de Poisson | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | N/A |
| Módulo de cisalhamento (GPa) | 1,0 | 3,2 | 26,0 | 5,0 | N/m ² |
| Massa específica (x1000) | 1,1 | 1,4 | 2,7 | 1,2 | kg/m ³ |
| Resistência de tração (MPa) | 90,0 | 142,6 | 310,0 | 476,2 | N/m ² |
| Limite de escoamento (MPa) | 103,6 | 139,0 | 275,0 | 600,0 | N/m ² |

Fonte: Adaptado de SolidWorks / Assumpção et al (2010) / Almeida (2018).

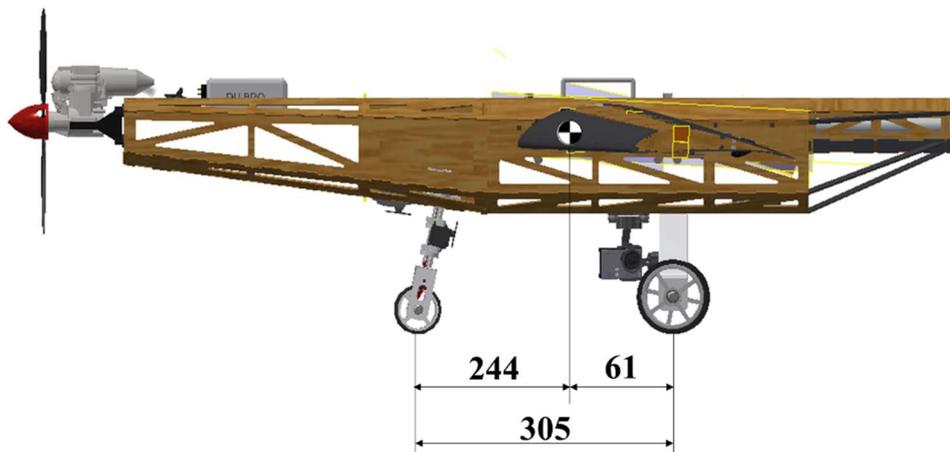
Com base no quadro comparativo, foi estabelecido para cada componente o seu material, conforme a seguir:

- Roda: apesar de ser um componente que tem contato com o solo durante toda a etapa de voo, e exige um material com boa resistência a abrasão, um dos principais critérios de seleção é o peso e a resistência ao esforço durante o pouso. Sendo então definido para a roda, o poliacetal, o nylon e o alumínio. Passando a definição final somente após as simulações.
- Chapa principal: sabido da alta resistência a tração, além das ótimas propriedades mecânicas da fibra de carbono, foi definido que para a chapa principal seria viável este material, a menos que durante a simulação apresentasse algum defeito.

4.6.3 Atribuição de cargas

Primeiramente foram definidas as distâncias do centro geométrico da aeronave para o trem de pouso principal e do trem de pouso auxiliar. Conforme as equações de ISCOLD (2002) de acordo com a norma FAR part 23, utilizando os dados obtidos, foram definidas as cargas no trem de pouso para situação crítica de pouso.

Figura 32 - Esquema para distribuição de carregamento estático



Fonte: Adaptado de Urutau Aerodesign

Quadro 5 - Intensidade dos carregamentos de acordo com cada situação de pouso.

| CONDIÇÃO DE POUSO | Sentido da carga no trem principal | Intensidade (N) | Sentido da carga na bequilha | Intensidade (N) |
|------------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| CONDIÇÃO A | Vertical para cima | 243,20 | Vertical para cima | 121,54 |
| CS-VLA 479 (a)(2)(i) | Horizontal para trás | 60,80 | Horizontal para trás | 30,39 |
| CONDIÇÃO B | Vertical para cima | 304,00 | n.a | 0,00 |
| CS-VLA 479 (a)(2)(ii) | Horizontal para trás | 76,00 | n.a | 0,00 |
| CONDIÇÃO C | Vertical para cima | 304,00 | n.a | 0,00 |
| CS-VLA 481 (a)(2) | Horizontal para trás | 0,00 | n.a | 0,00 |
| CONDIÇÃO D | Vertical para cima | 608,00 | n.a | 0,00 |
| CS-VLA 483 | Horizontal para trás | 152,00 | n.a | 0,00 |
| CONDIÇÃO E | Vertical para cima | 106,40 | n.a | 0,00 |
| CS-VLA 485 | Horizontal lateral (L/R) | 80/52,8 | n.a | 0,00 |
| CONDIÇÃO F | Vertical para cima | 56,33 | Vertical para cima | 100,13 |
| CS-VLA 493 | Horizontal para trás | 45,06 | Horizontal para trás | 0,00 |
| CONDIÇÃO G | n.a | 0,00 | Vertical para cima | 71,96 |
| CS-VLA 499 (a) | n.a | 0,00 | Horizontal para trás | 25,59 |
| CONDIÇÃO H | n.a | 0,00 | Vertical para cima | 71,96 |
| CS-VLA 499 (b) | n.a | 0,00 | Horizontal para trás | 12,79 |
| CONDIÇÃO I | n.a | 0,00 | Vertical para cima | 71,96 |
| CS-VLA 499 (c) | n.a | 0,00 | Horizontal lateral | 22,39 |

Fonte: Urutau Aerodesign

- CS-VLA 479 (a) (2) (i) – Aterragem Nivelada em Três Rodas;
- CS-VLA 479 (a) (2) (ii) – Aterragem nas Rodas Principais;
- CS-VLA 481 – Aterragem com Cauda Baixa;
- CS-VLA 483 – Aterragem numa Roda Principal;
- CS-VLA 485 – Forças Laterais nas Rodas Principais, Forças de Frenagem;
- CS-VLA 499 – Condições Suplementares da Roda do Nariz para trás, frente e lateral.

Para critério de análise na roda será utilizado a situação mais crítica de pouso, sendo ela a em aterragem numa única roda, o que leva o esforço ao extremo em única peça. E para a chapa

principal, a situação mais crítica é quando está apoiado nas duas rodas principais, ou seja, somente no trem principal, levando a chapa a esforços extremos. Ficando então definido:

- ✚ Carga máxima na roda: $V_g = 608$ N vertical;
- ✚ Carga máxima na chapa principal: $V_g = 304$ N vertical.

4.6.4 Simulação

Para realizar a simulação de carregamento nas peças do trem de pouso principal, definido no trabalho, foi utilizado o *simulation* do software SolidWorks, amplamente utilizado em análises com média complexidade.

Os objetivos em realizar uma análise estrutural pelo método de elementos finitos, consiste em:

- ✓ Saber como a estrutura se comporta com o material aplicado;
- ✓ Discretizar o elemento em estudo através de nós;
- ✓ Conhecer as zonas de deformação do elemento;
- ✓ Conhecer os limites de estruturais mediante aos esforços inseridos;
- ✓ Interpretar os resultados de forma lógica e coerente.

Para as análises foi utilizado a malha tetraédrica para obter resultado mais precisos acompanhada do critério de falha de Von Misses, que pode posteriormente ser comparado com critério de falha de Tresca.

4.6.4.1 Tensão máxima admissível

Para a confecção do projeto físico e sua utilização, não queremos que haja deformações permanentes nas peças, ou seja, estas devem se manter no regime elástico. Com base nos materiais definidos, as tensões admissíveis determinadas a partir do limite de escoamento, utilizando o fator de segurança de 1,5 conforme sugerido na norma FAR-PART 25, são:

$$\sigma_{Adm} < \frac{\sigma_{esc}}{FS} \quad (9)$$

Quadro 6 - Tensões admissíveis com fator de segurança de 1,5.

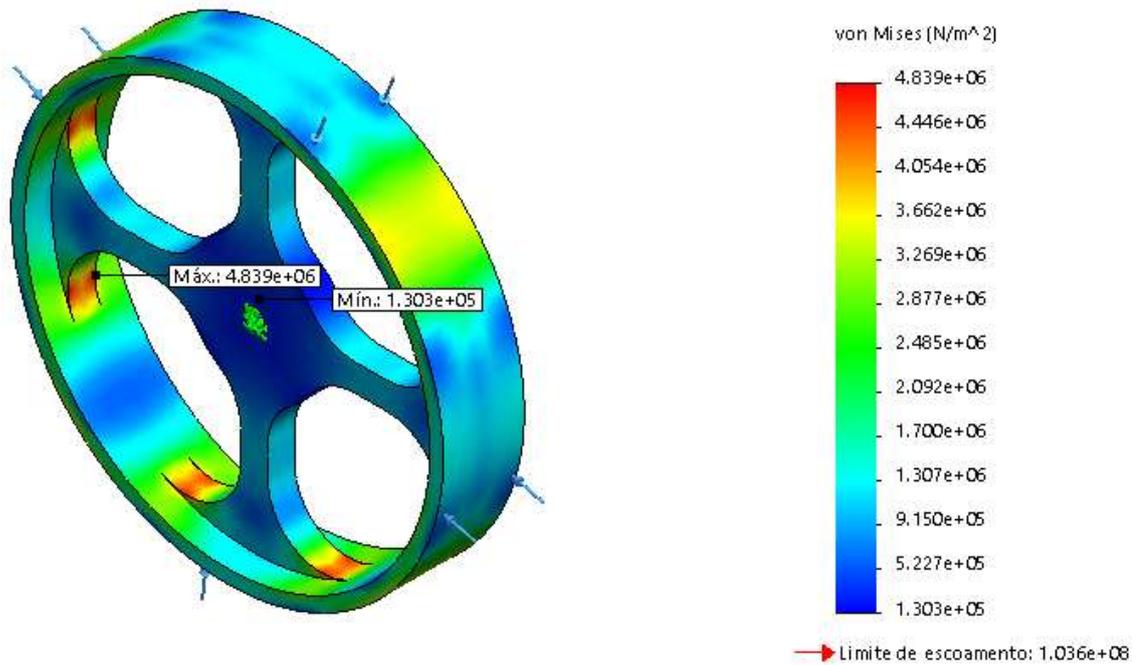
| Material | Limite de escoamento (MPa) | Tensão admissível (MPa) |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Poliacetil Tipo 6 | 103,6 | 69,1 |
| Nylon 6/10 | 139 | 92,7 |
| Alumínio | 275 | 183,3 |
| Fibra de carbono + resina | 600 | 400 |

Fonte: Autor

4.6.4.2 Simulação Roda

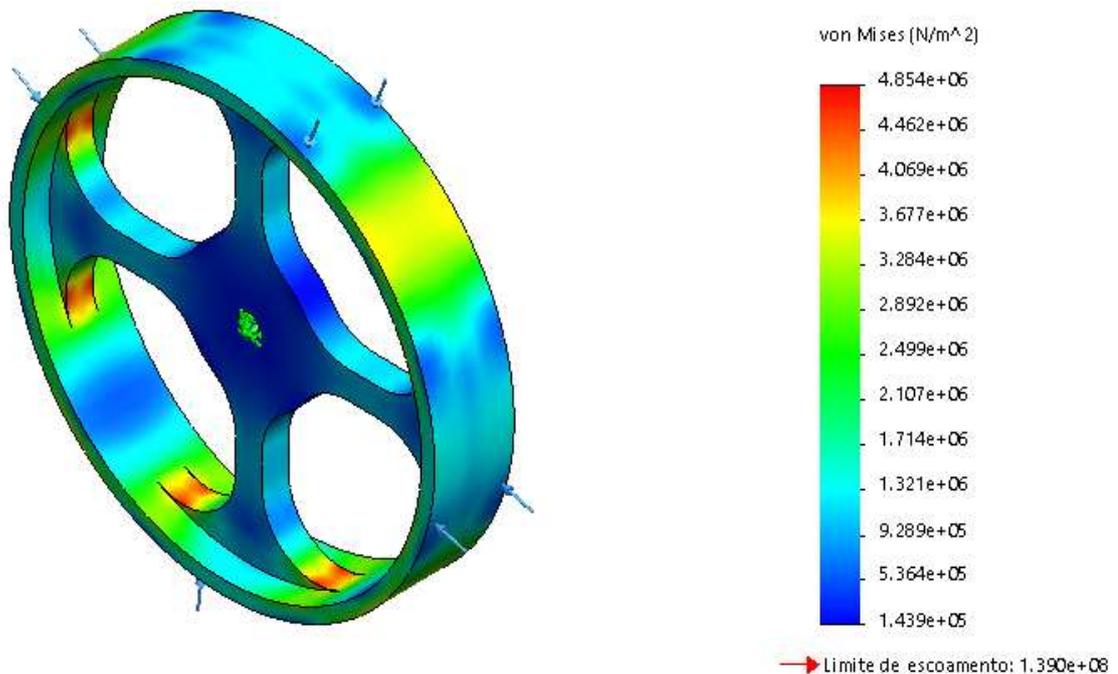
Como já estabelecido, a roda é a primeira peça a receber os esforços durante o pouso, na simulação foi considerado, como já determinado a situação mais crítica, que é o pouso em apenas uma roda, tendo esforço máximo.

Figura 33 - Resultado da tensão de Von Misses - Material: Poliacetal



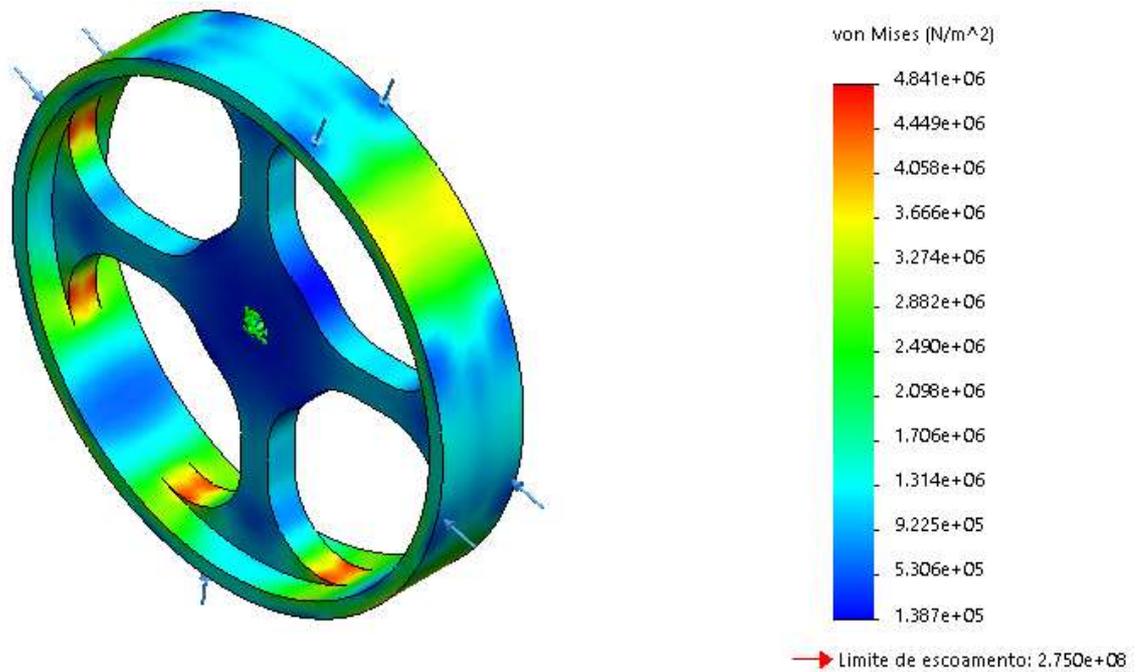
Fonte: Autor

Figura 34 - Resultado da tensão de Von Misses - Material: Nylon



Fonte: Autor

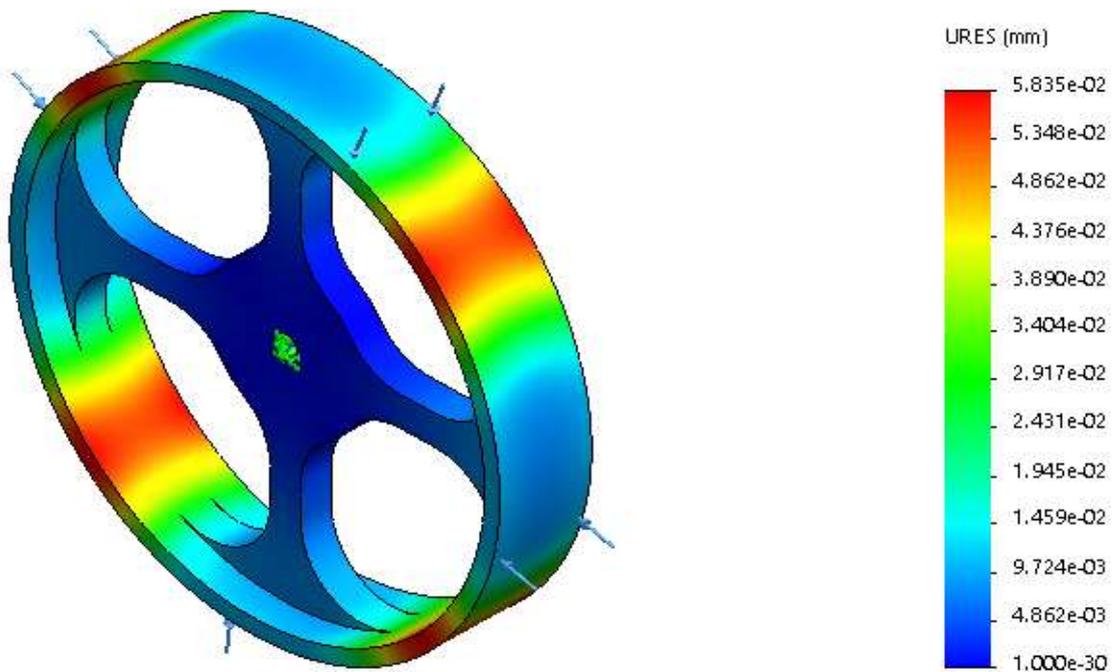
Figura 35 - Resultado da tensão de Von Mises - Material: Alumínio



Fonte: Autor

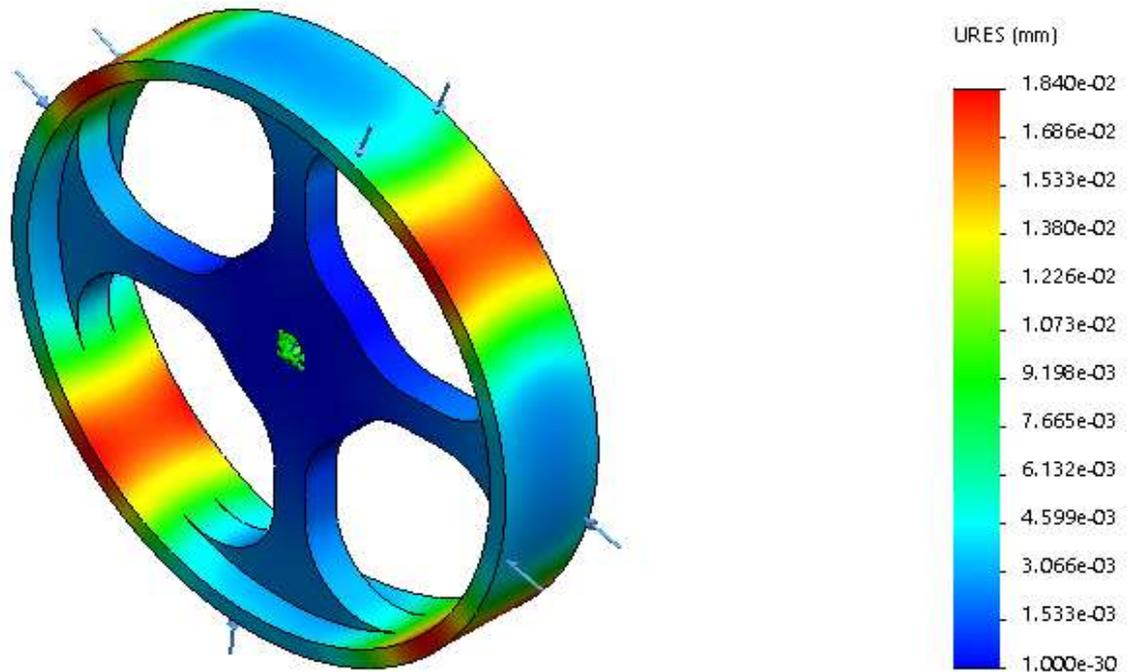
As simulações de tensão realizada na roda apresentam pontos com coloração mais avermelhada, porém não significa que a peça não suporta os esforços, apenas onde há maiores valores.

Figura 36 - Deslocamento da roda - Material: Poliacetal



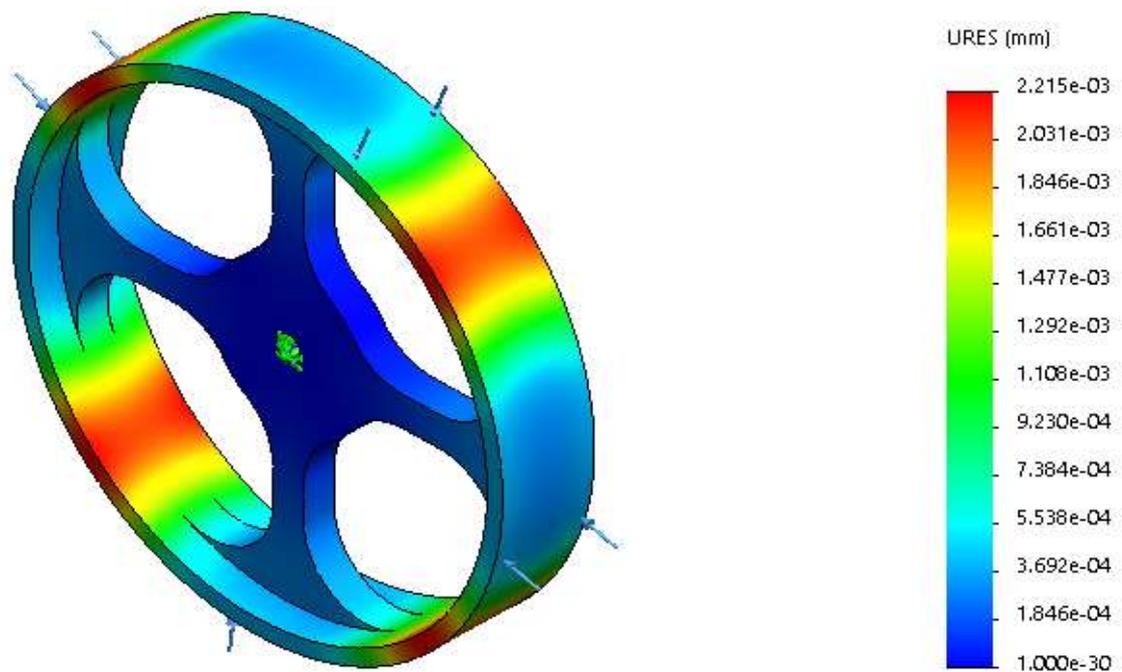
Fonte: Autor

Figura 37 - Deslocamento da roda - Material: Nylon



Fonte: Autor

Figura 38 - Deslocamento da roda - Material: Alumínio



Fonte: Autor

Assim como para as tensões, as cores avermelhadas na análise de deslocamento não significam que há problemas, apenas que são os valores mais elevados na análise.

Quadro 7 – Resultado da análise da roda, com comparativo entre materiais..

| Material | Tensão admissível (MPa) | Tensão máxima encontrada (MPa) | Deslocamento (mm) | Deformação | Massa (Kg) |
|------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------|------------|------------|
| Poliacetal | 69,1 | 4,839 | 0,00583 | 0,000152 | 0,01796 |
| Nylon | 92,7 | 4,854 | 0,00184 | 0,000045 | 0,02245 |
| Alumínio | 183,3 | 4,841 | 0,00022 | 0,000006 | 0,04329 |

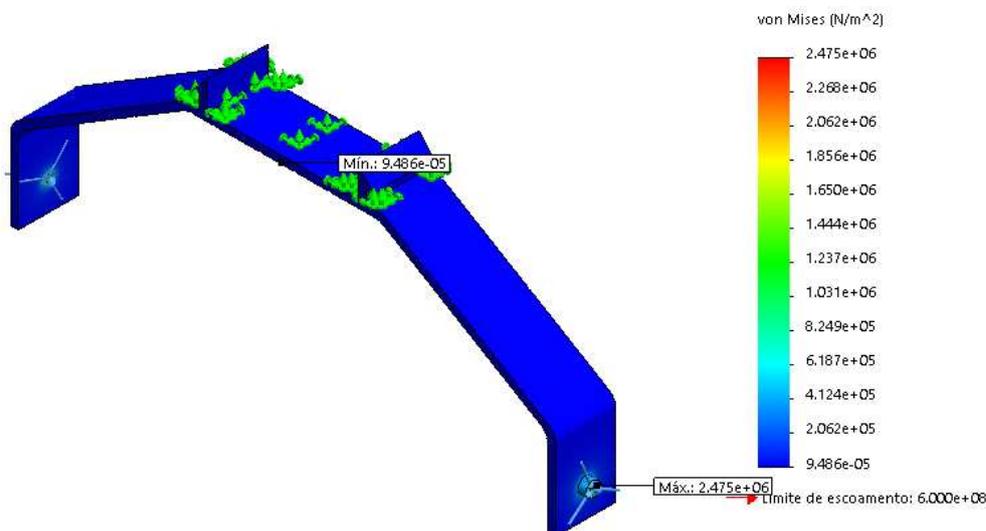
Fonte: Autor

Através do quadro 7, que resume os resultados encontrados, é possível observar que todos as três situações de material estabelecida atendem aos critérios analisados, ou seja, suportam os esforços e com deslocamentos mínimos. Dado que para comparação das tensões utiliza-se de um fator de segurança de 1,5 e para cálculo de esforços utiliza-se de um fator de carga de 3,8, o projeto definido para os três materiais está coerente com o real. Sendo que todos apresentam-se dentro dos critérios, o escolhido será aquele que apresenta menor massa, já que na competição é fundamental que os componentes apresentem menor massa possível e máxima resistência, sendo então a roda com material PA Tipo 6, a escolhida para compor o trem de pouso conceitual.

4.6.4.3 Chapa principal

Como já estabelecido, para a análise do trem será levado em consideração a situação mais crítica relacionada a esforços, que no caso, é quando há pouso somente com as rodas do trem de pouso principal, ficando os esforços somente nele, ou seja, o momento onde a chapa principal sofrerá maiores esforços.

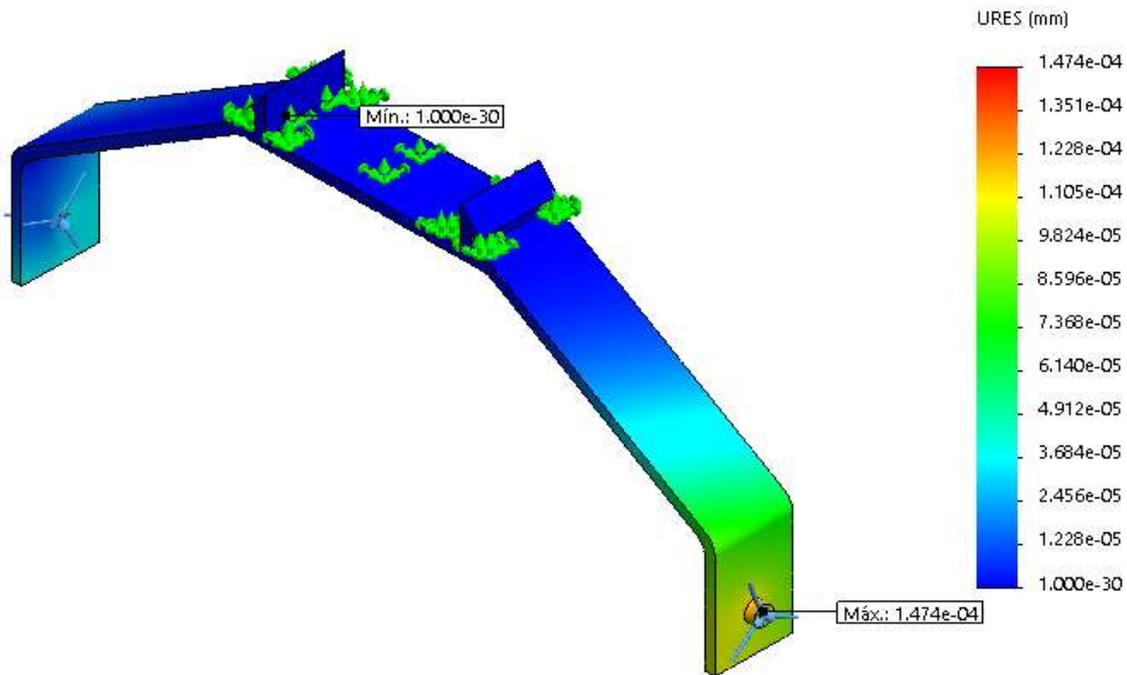
Figura 39 - Resultado da análise de tensão do trem de pouso conceitual.



Fonte: Autor

Como mostra a figura, as maiores tensões serão nos apoios das rodas, que têm o primeiro contato com solo, esse valor de tensão máxima que é de 2,475 MPa é muito menor que a tensão admissível de 400 MPa, logo não ocorrerá preocupações relacionadas as resistências de tensão.

Figura 40 - Resultado da análise de deslocamento do trem de pouso conceitual.



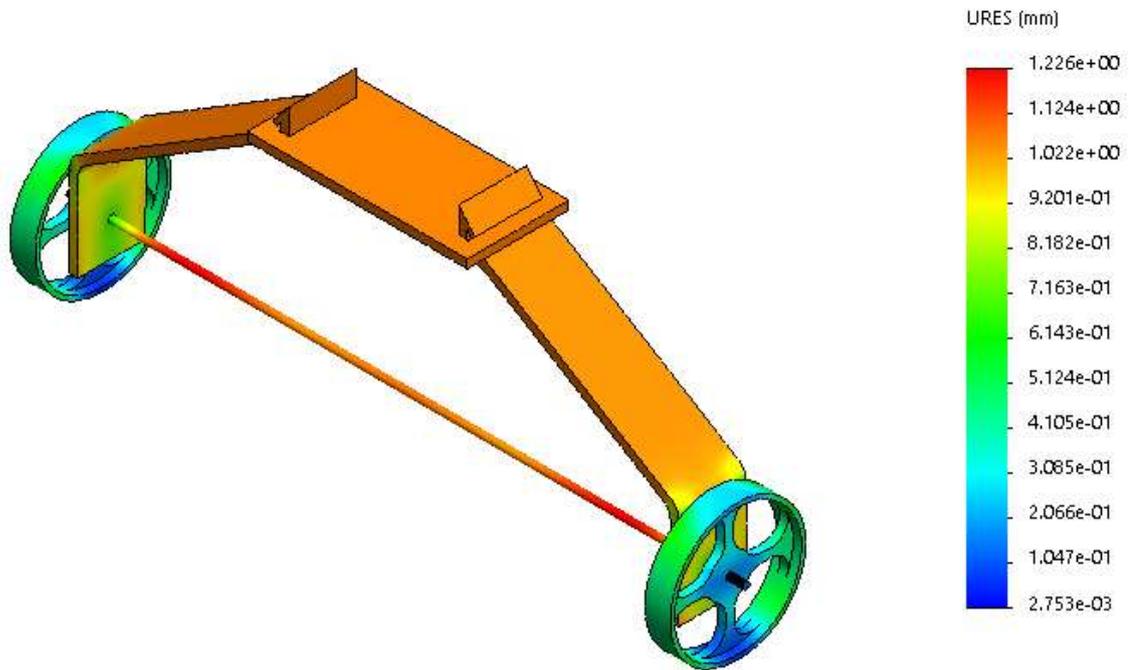
Fonte: Autor

Assim como as tensões, os pontos onde correrão maiores deslocamentos são onde irá receber as rodas, o valor máximo encontrado para o deslocamento foi de 0,01474E-3 mm, visto que foram aplicados o fator de segurança as tensões e o fator de carga aos esforços, o valor encontrado é coerente e admissível ao projeto.

4.6.4.3 Drop Test

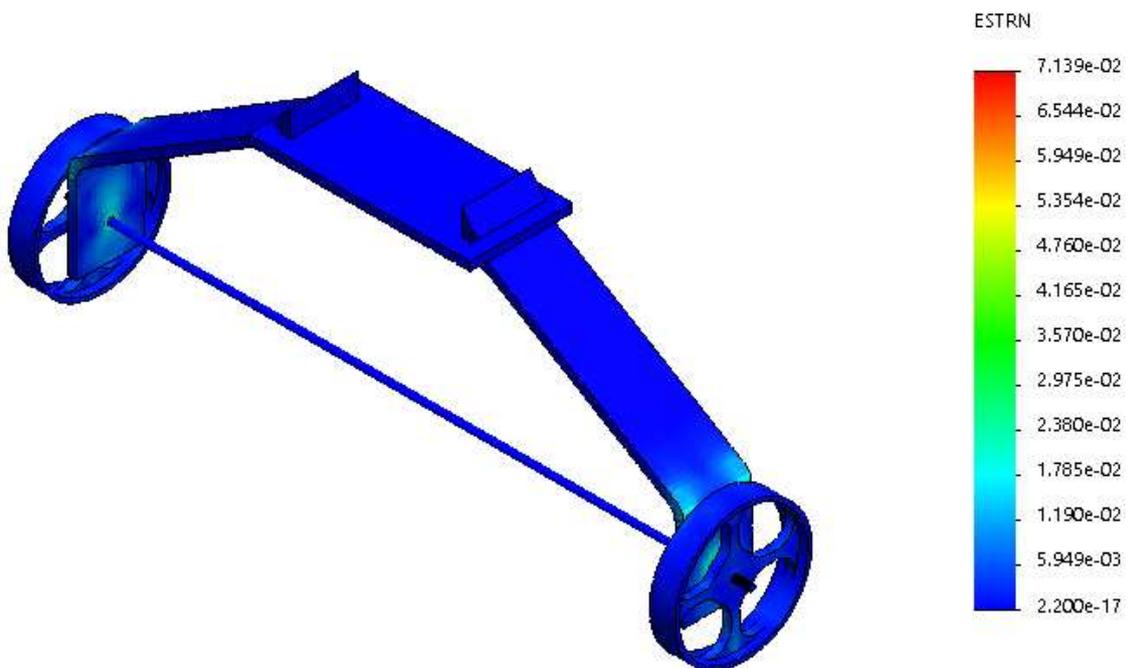
A última análise serve para certificar que o trem de pouso conceitual realmente pode ser utilizado, para isso foi considerado a situação mais crítica, ou seja, com uma simulação do carregamento máximo no trem de pouso e uma altura acima do estabelecido na norma FAR 23, que é de 230 mm, sendo para este teste utilizado 1000mm.

Figura 41 - Resultado da análise de deslocamento para o *Drop test*.



Fonte: autor

Figura 42 - Resultado da análise de deformação no *Drop test*.



Fonte: Autor

Feito a simulação do Drop test, observa-se que o resultado para o deslocamento e deformação são favoráveis, não havendo grandes alterações, garantindo a integridade do projeto, com isso o trem de pouso conceitual está apto para ser usado nas próximas competições.

CONCLUSÃO

O trem de pouso principal é um componente fundamental para garantir a estabilidade e integridade da aeronave durante a decolagem e pouso.

A pesquisa bibliográfica apresentou grande relevância para fundamentar e encontrar métodos pertinentes ao conteúdo do trabalho, assim como trabalhos similares, voltados para o dimensionamento de trem de pouso.

O método de Lucas para o DFMA integrado a engenharia reversa proporcionou enorme êxito para a proposta do trabalho, reprojeter o trem de pouso principal, cumprindo todas as análises necessárias para validar um projeto com parâmetros geométricos e de montagem aceitáveis diante dos critérios exigidos.

As análises realizadas com método DFMA de Lucas para o trem de pouso foram muito relevantes e seus resultados significativos, apresentando um ganho de 42 % para a análise funcional, e reduções para a análise de alimentação e análise de montagem, sendo essas respectivamente de 72 % e 84 %, fato que comprova que o método utilizado foi eficiente para o reprojeto do trem de pouso, garantido maiores eficiências.

A utilização da tecnologia CAD (desenho assistido por computador), proporcionou projetar o trem de pouso conceitual de forma assertiva, garantindo a visualização do projeto para verificação de possíveis erros de montagem, sendo eficaz no projeto das peças.

Para complementar a tecnologia CAD, a utilização da tecnologia CAE (engenharia auxiliada por computador) integrada ao método de elementos finitos, contribuiu para o dimensionamento e análise das peças projetadas, mostrando todos os pontos de concentração de tensão e deformações, garantindo que o reprojeto tenha confiabilidade na sua utilização.

As simulações realizadas ajudam a analisar o comportamento das peças que compõem o trem de pouso em situações funcionais do mesmo, ajudando a prevenir possíveis falhas de projeto antes de sua confecção. Através das simulações foi possível definir o poliacetal como o material ser utilizado nas rodas, e comprovar que os materiais definidos para as demais peças suportavam todos os carregamentos.

O *Drop Test* sendo um dos principais testes para validar o trem de pouso, foi realizado por método computacional, comprovando que o trem de pouso estava apto a sua funcionalidade, apresentando bons parâmetros de resistência e deformação.

O trabalho apresentado proporcionou demonstrar técnicas e análises aprendidas durante o período acadêmico e tempo de participação na equipe Urutau, além de novos conhecimentos

através da pesquisa bibliográfica, que irão contribuir de forma significativa para a carreira profissional.

Espera-se que com esse trabalho, novas técnicas de desenvolvimento de projeto sejam utilizadas para maximizar a eficiência de montagem e fabricação de novos itens, assim como o aperfeiçoamento de produtos já existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos a base da tecnologia CAE**. 2000 1. Ed. Editora Érica Ltda.
- ALMEIDA, Gustavo S. **Dimensionamento de um modelo simplificado de trem de pouso por probabilidade de falha**. 2018. Dissertação (graduação Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.
- ASSUMPÇÃO, M.E. et al. **Projeto estrutural de um trem de pouso para uma aeronave rádio - controlada**. IX Simpósio de Mecânica Computacional. Universidade Federal de São João Del Rei – MG, 2010.
- BARBOSA, Gustavo Franco. **Aplicação da metodologia DFMA – design for manufacturing and assembly no projeto e fabricação de aeronaves**. 2007. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.
- BARROS, C. P. **Introdução do Projeto de Aeronaves Leves**. Belo Horizonte: CEA. 2001.
- BALDISSERA, Adelina. **PESQUISA-AÇÃO: uma metodologia do “conhecer” e do “agir” coletivo**. 2001. Sociedade em Debate, Pelotas, 7(2):5-25.
- BERTIN, Rodrigo. **Implementação do método e conceitos DFMA em projetos para construção de equipamentos**. 2018. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção), Universidade de Caxias do Sul – UCS, Rio Grande do Sul.
- BOOTHROYD, G., Dewhurst, P. e Knight, W, 2002. **Product Design for Manufacture and Assembly**. Marcel Dekker, Inc., 2nd edition.
- CALLISTER JR., W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de S.M.S. Soares. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos, 2008. Único. 705 p. ISBN 978-85-216-1595-8.
- CHAN, V., e SALUSTRI, F.A., 2003. **“DFA: The Lucas Method”**. 14 Dez. 2018 <<http://deed.ryerson.ca/~fil/t/dfmlucas.html>> .
- CISMASIU, C. **Método dos Elementos Finitos**. Apresentação. Universidade Nova de Lisboa. 2006.

DOCHIBHATLA, S.V., BHATTACHARYA, M. e MORKOS, B., 2017. **“Evaluating Assembly Design Efficiency: A Comparison Between Lucas and Boothroyd-Dewhurst Methods”**. In ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Cleveland, Ohio, USA.

DEWHURST, P.; KNIGHT, W.; BOOTHROYD, G. **Product Design for Manufacture and Assembly**. 2.ed. New York: LLC, 2002.

DIAS, A. B. **Engenharia reversa: uma porta ainda aberta**. Produto & Produção, v. 2, n. 1, p. 1-7, 1998.

DUFOUR, C. A. **Estudo do processo e das ferramentas de reprojeto de produtos industriais, como vantagem competitiva e estratégia de melhoria constante**. 1996, 122 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

FAR-PART 25 FAA. FAR-PART 25, **Part 25: Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes**. 2005.

FEDERAL AVIATION REGULATIONS (FAR), **Part 23 Airwothiness Standarts**, USA

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais I**. Russell Charles Hibbeler ; tradução Arlete Simille Marques ; revisão técnica Sebastião Simões da Cunha Jr.7. ed. - São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2010

INGLE, K.A., 1994. **Reverse Engineering**, Lenxgton: McGraw Hill, 1994.

ISCOLD, P. H. I. O. (2002). **Introdução às Cargas nas Aeronaves**. Desenvolvimento dematerial didático ou instrucional - Apostila.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos da metodologia científica** . 5.ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MELLO, Carlos Henrique Pereira et al. **Projeto conceitual de componentes de um forno industrial por meio da integração entre a engenharia reversa e o DFMA**. Gest. Prod. [online]. 2010, vol.17, n.3, pp.497-511. ISSN 0104-530X.

MELLO, Carlos. et al. **Integrating Reverse Engineering and Design for Manufacturing and Assembly in Products Redesigns: Results of Two Action Research Studies in Brazil**.

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Centro de Otimização de Fabricação e Inovação Tecnológica (NOMATI). 2012.

MURY, Luiz Gilberto Monclaro. **Uma metodologia para adaptação e melhoria de produtos a partir da engenharia reversa**.2000. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

MALEWSCHIK, Fernando H. **BIM e DFMA visando a redução da quantidade de partes da construção**. 2016. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba).

MAFALDA, Rovilson. CORREA, Ana Magda Alencar. **Projeto para manufatura e montagem: uma prática de aprendizagem baseada em projetos**. Revista Educação Gráfica, V.20 – Nº. 01, 2016 .

OTTO, K.N. e WOOD, K.L., 1998. Product Evolution: **A Reverse Engineering and Redesign Methodology**. Research in Engineering Design (1998)10:226–243.

PAHL, G. et al. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale,2013.

RAJA, Vinesh; FERNANDES, Kiran J. **Reverse engineering : an industrial perspective**. Springer-Verlag London Limited, 2008.

RAYMER, D.P.; AIAA (Org.). **Aircraft design: a conceptual approach**. 3. ed. Washington,DC: AIAA, c1999. Único. 923 p. (AIAA Education Series / J.S. Przemieniecki). ISBN 1-56347-281-0.

REVISTA BRASILEIRA DE FÍSICA TECNOLÓGICA APLICADA. **Otimização estrutural de um macaco hidráulico**. Ponta Grossa, v. 4, n. 2, p. 42-62, dez. 2017.

REZENDE, Mirabel C. **Fractografia de Compósitos Estruturais**. Polímeros: Ciência e tecnologia, vol. 17, nº 3, São José dos Campos, Sp, 2007.

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. São Paulo: Atlas, 1999.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda José, 1973 - **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign: Estabilidade e Estruturas** / Luiz Eduardo Miranda José Rodrigues – Salto/SP: www.engbrasil.eng.br, 2014.

ROSA, Edison. **Projeto Aeronáutico: uma contribuição à competição SAE aerodesign**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2002.

SOUZA, Joab Francisco de. **Aplicação de projeto para manufatura e montagem em uma abordagem de engenharia reversa: estudo de caso**. 2007. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. Ed. Santa Catarina : Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 2005.

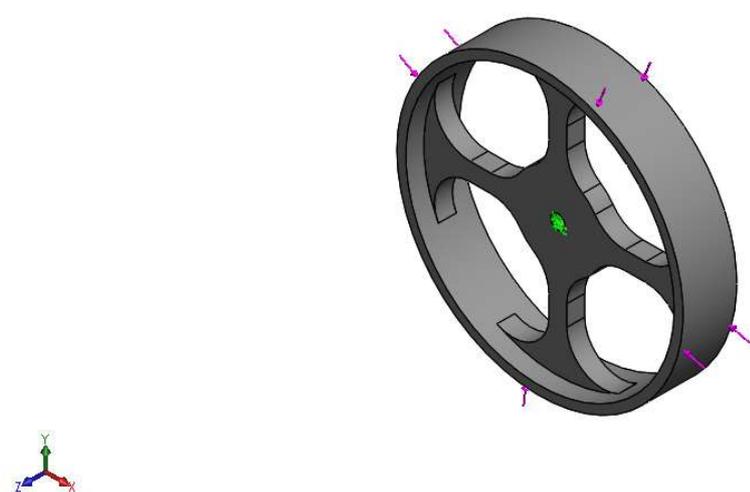
SILVA, Carlos E.S. **Método para avaliação do desempenho do processo de desenvolvimento de produtos**. 2001. Tese (doutor em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 11 a 15 de abril de 2011 Caxias do Sul RS – Brasil, **Aplicação dos métodos AV, DFMA e FMEA de projeto em uma tábua de passar roupas retrátil**. Edu Back 1, Liliane Klemann 1, Carla Estorilio 1, 1

XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO, 10 a 13 de outubro de 2017, Joinville, SC, Brasil . **Aplicação do design for assembly and manufacturing (DFMA) no projeto conceitual de um comedouro automático para cães**.

APÊNCIDE A - SIMULAÇÃO DA RODA COM MATERIAL PA

Informações do modelo

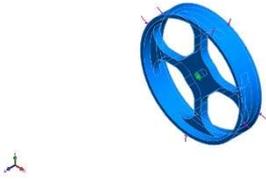
|  | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Nome do modelo: Roda_rev03_PA Configuração atual: Valor predeterminado</p> | | |
| Corpos sólidos | | |
| Nome e referência do documento | Tratado como | Propriedades volumétricas |
| Filete1  | Corpo sólido | Massa:0.0179596 kg Volume:1.60353e-05 m ³ Densidade:1120 kg/m ³ Peso:0.176004 N |

Propriedades do estudo

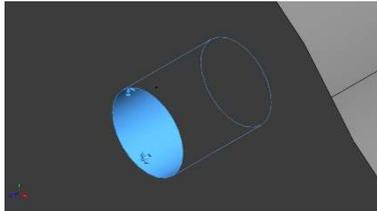
Unidades

| | |
|---------------------------------|------------------|
| Sistema de unidades: | SI (MKS) |
| Comprimento/Deslocamento | mm |
| Temperatura | Kelvin |
| Velocidade angular | Rad/s |
| Pressão/Tensão | N/m ² |

Propriedades do material

| Referência do modelo | Propriedades |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Nome: PA Tipo 6 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Limite de escoamento: 1.03649e+08 N/m² Resistência à tração: 9e+07 N/m² Módulo elástico: 2.62e+09 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.34 Massa específica: 1120 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 9.704e+08 N/m²</p> |

Acessórios de fixação e Cargas

| Nome do acessório de fixação | Imagem de acessório de fixação | Detalhes de acessório de fixação | | |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|
| Fixo-1 |  | <p>Entidades: 1 face(s) Tipo: Geometria fixa</p> | | |
| Forças resultantes | | | | |
| Componentes | X | Y | Z | Resultante |
| Força de reação(N) | 0.000354022 | 0.0011167 | 0.000297807 | 0.00120874 |

| Nome da carga | Carregar imagem | Detalhes de carga |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Força-1 |  | <p>Entidades: 1 face(s) Tipo: Aplicar força normal Valor: 608 N</p> |

Informações de malha

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| Tipo de malha | Malha sólida |
| Gerador de malhas usado: | Malha padrão |
| Pontos Jacobianos | 4 Pontos |
| Tamanho do elemento | 2.52262 mm |
| Tolerância | 0.126131 mm |
| Plotagem de qualidade de malha | Alta |

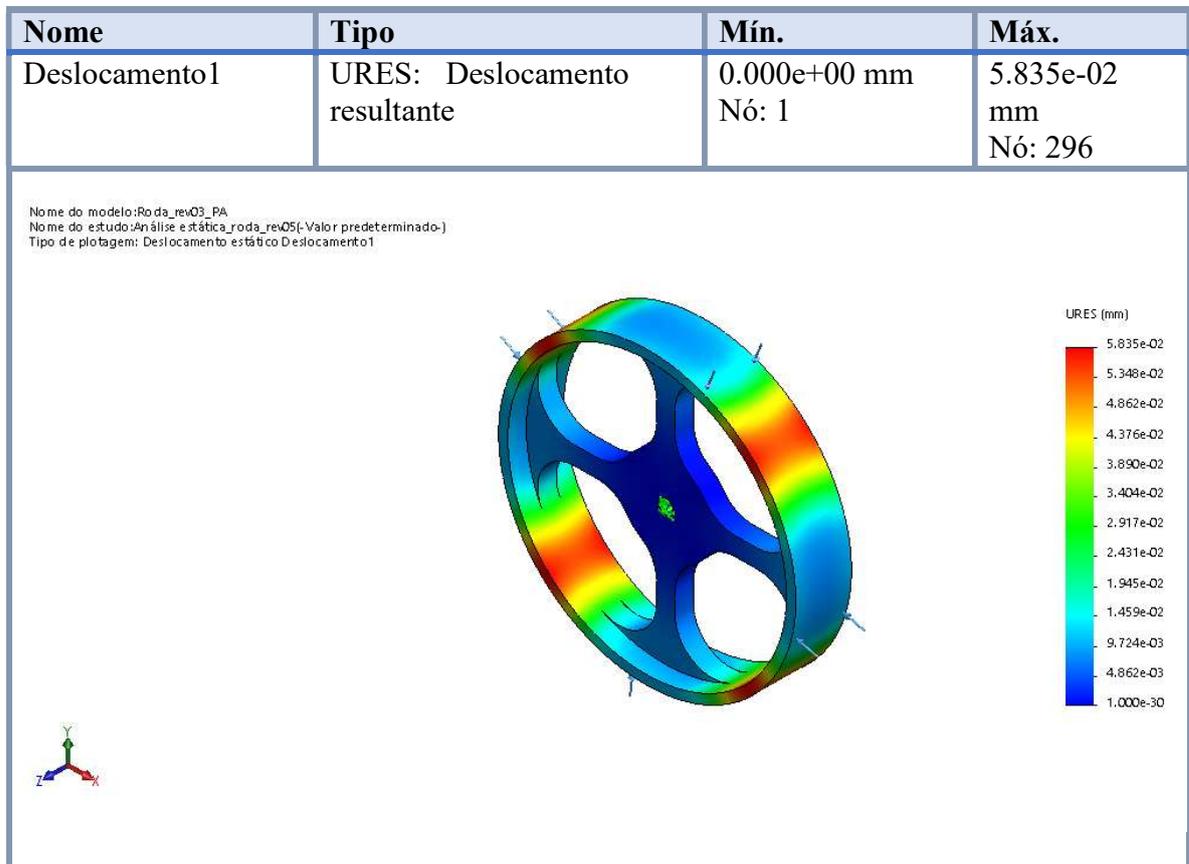
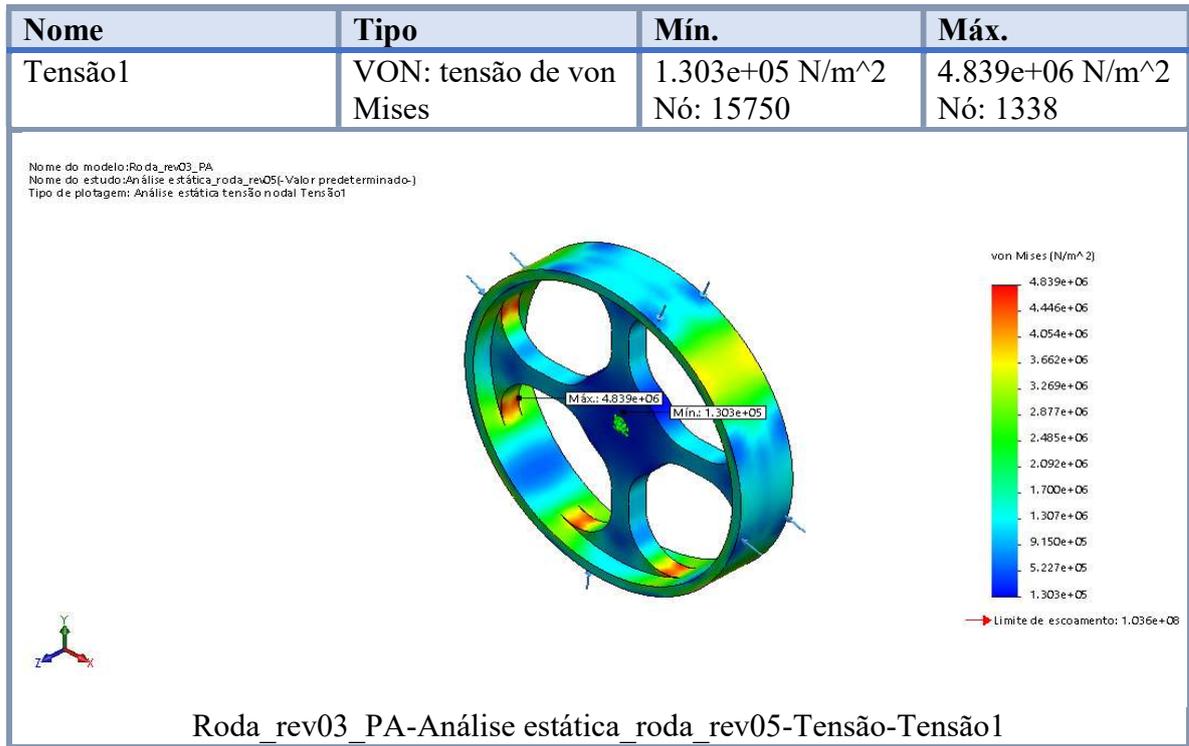
Informações de malha - Detalhes

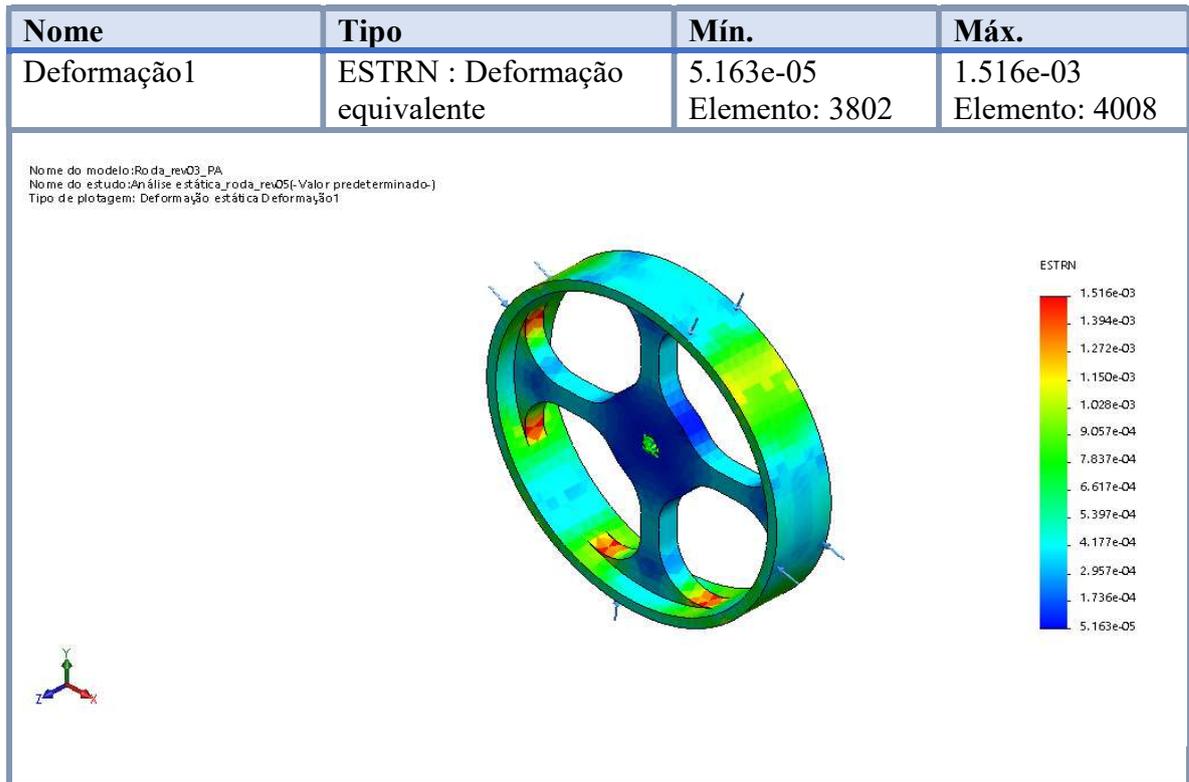
| | |
|--------------------------------------------------|----------|
| Total de nós | 15850 |
| Total de elementos | 8656 |
| Proporção máxima | 16.082 |
| % de elementos com Proporção < 3 | 98.5 |
| % de elementos com Proporção < 10 | 0.289 |
| % de elementos distorcidos(Jacobiana) | 0 |
| Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss): | 00:00:02 |

Nome do modelo: Roda_rev03_PA
 Nome do estudo: Análise estática_roda_rev05(-Valor predeterminado-)
 Tipo de malha: Malha sólida



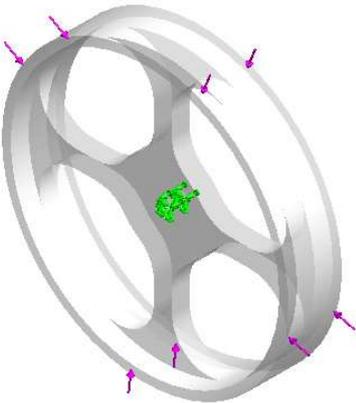
Resultados do estudo





APÊNDICE B - SIMULAÇÃO DA RODA COM MATERIAL NYLON

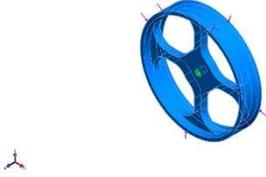
Informações do modelo

|  | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | | |
| Nome do modelo: análise_estatica_roda_rev01 Configuração atual: Valor predeterminado | | |
| Corpos sólidos | | |
| Nome e referência do documento | Tratado como | Propriedades volumétricas |
| Filete1  | Corpo sólido | Massa:0.0224495 kg Volume:1.60353e-05 m ³ Densidade:1400 kg/m ³ Peso:0.220005 N |

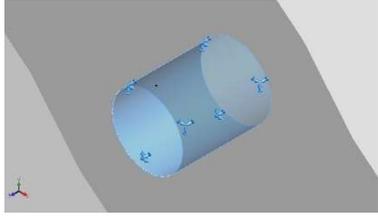
Unidades

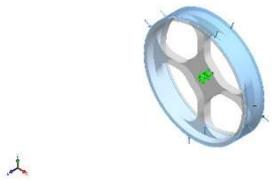
| | |
|---------------------------------|------------------|
| Sistema de unidades: | SI (MKS) |
| Comprimento/Deslocamento | mm |
| Temperatura | Kelvin |
| Velocidade angular | Rad/s |
| Pressão/Tensão | N/m ² |

Propriedades do material

| Referência do modelo | Propriedades |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Nome: Náilon 6/10 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Limite de escoamento: 1.39043e+08 N/m² Resistência à tração: 1.42559e+08 N/m² Módulo elástico: 8.3e+09 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.28 Massa específica: 1400 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 3.2e+09 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 3e-05 /Kelvin</p> |

Acessórios de fixação e Cargas

| Nome do acessório de fixação | Imagem de acessório de fixação | Detalhes de acessório de fixação | | |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Fixo-1 |  | <p>Entidades: 1 face(s) Tipo: Geometria fixa</p> | | |
| Forças resultantes | | | | |
| Componentes | X | Y | Z | Resultante |
| Força de reação(N) | -0.00122523 | 0.000269324 | -0.000142217 | 0.00126252 |

| Nome da carga | Carregar imagem | Detalhes de carga |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Força-1 |  | <p>Entidades: 1 face(s) Tipo: Aplicar força normal Valor: 608 N</p> |

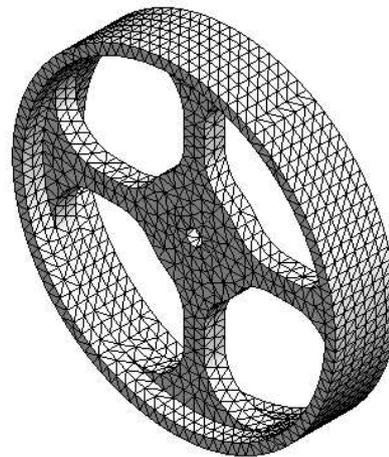
Informações de malha

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| Tipo de malha | Malha sólida |
| Gerador de malhas usado: | Malha padrão |
| Pontos Jacobianos | 4 Pontos |
| Tamanho do elemento | 2.52262 mm |
| Tolerância | 0.126131 mm |
| Plotagem de qualidade de malha | Alta |

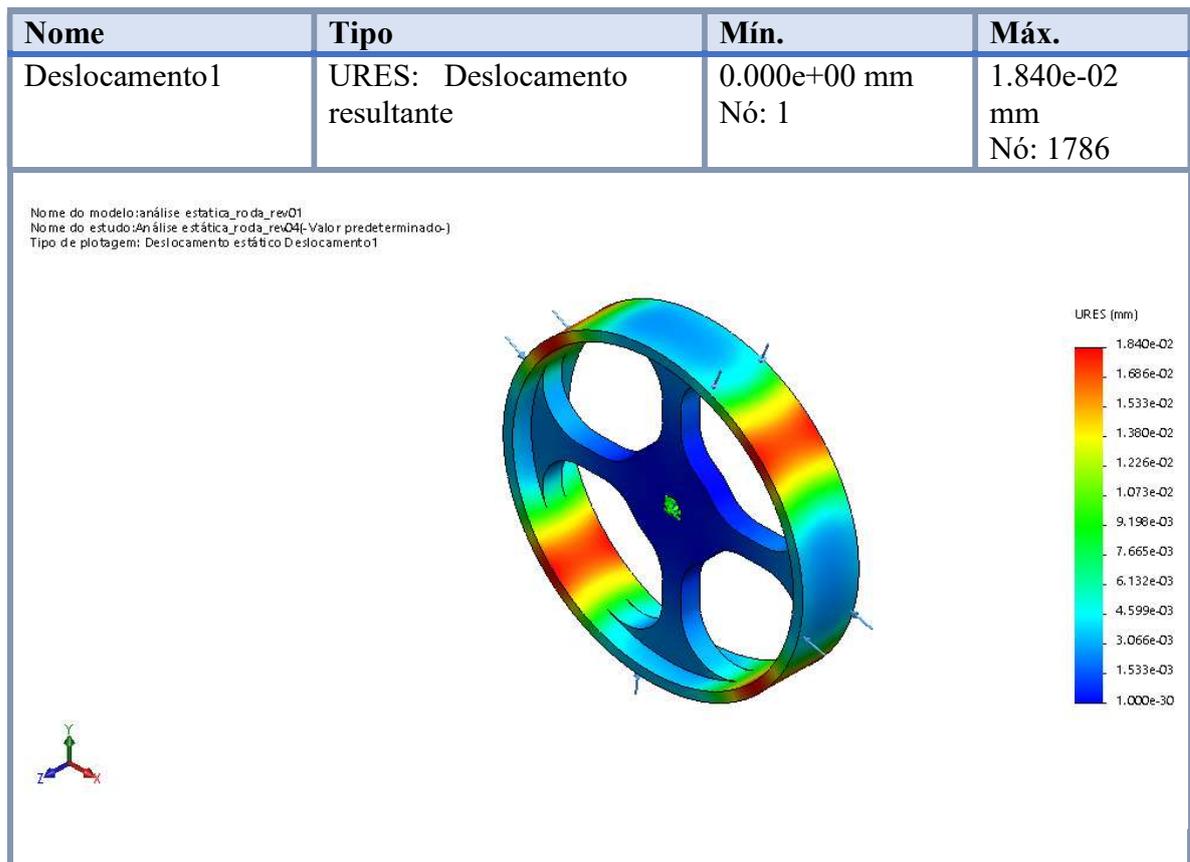
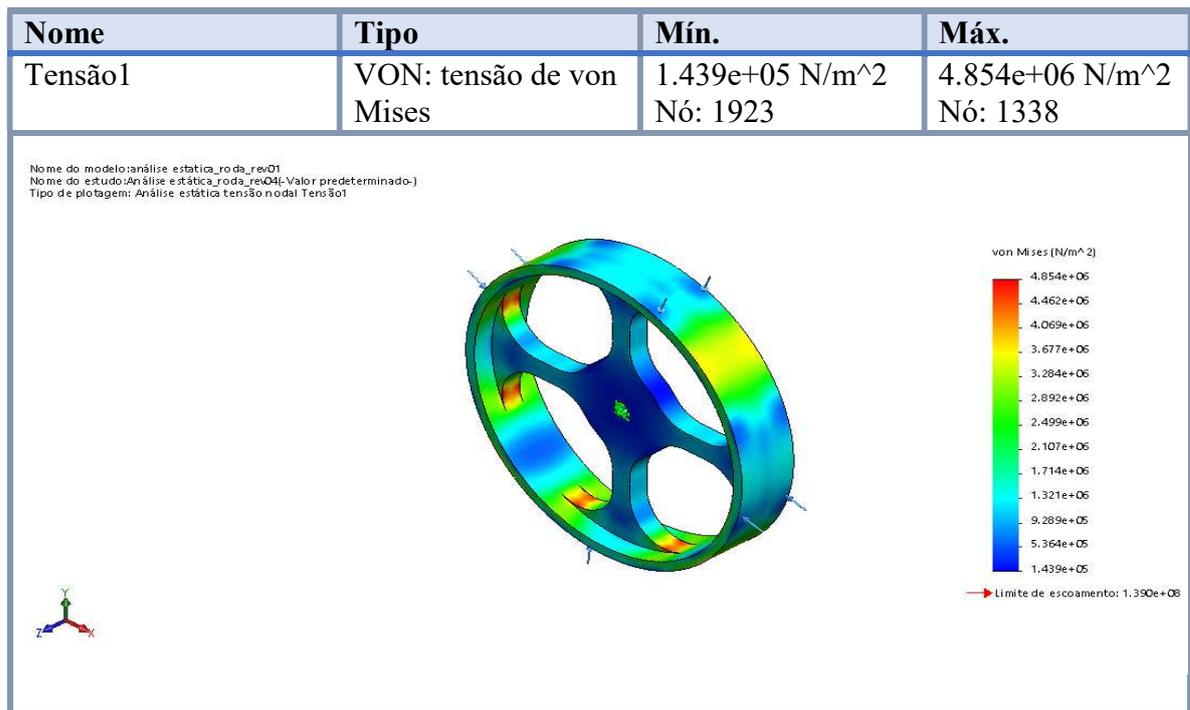
Informações de malha - Detalhes

| | |
|--------------------------------------------------|----------|
| Total de nós | 15850 |
| Total de elementos | 8656 |
| Proporção máxima | 16.082 |
| % de elementos com Proporção < 3 | 98.5 |
| % de elementos com Proporção < 10 | 0.289 |
| % de elementos distorcidos(Jacobiana) | 0 |
| Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss): | 00:00:01 |
| Nome do computador: | |

Nome do modelo: análise_estática_roda_rev01
Nome do estudo: Análise estática_roda_rev04(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

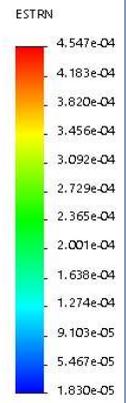
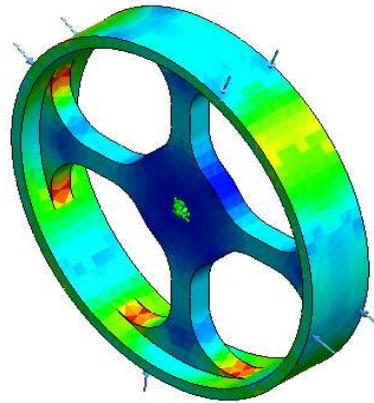


Resultados do estudo



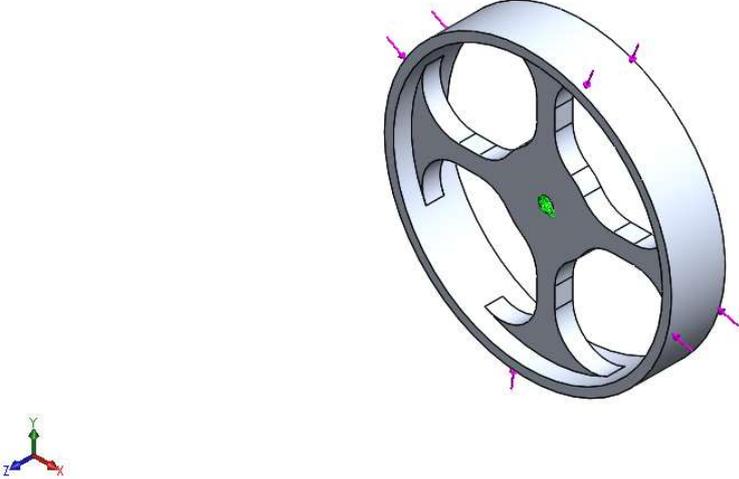
| Nome | Tipo | Mín. | Máx. |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Deformação1 | ESTRN : Deformação equivalente | 1.830e-05 Elemento: 3802 | 4.547e-04 Elemento: 4008 |

Nome do modelo: análise estática_roda_rev01
Nome do estudo: Análise estática_roda_rev04(Valor predeterminado)
Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1



ICE C - SIMULAÇÃO DA RODA COM MATERIAL ALUMÍNIO

Informações do modelo



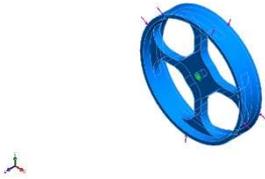
Nome do modelo: Roda_rev02
Configuração atual: Valor predeterminado

| Corpos sólidos | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nome e referência do documento | Tratado como | Propriedades volumétricas |
| Filete1  | Corpo sólido | Massa:0.0432954 kg Volume:1.60353e-05 m ³ Densidade:2700 kg/m ³ Peso:0.424295 N |

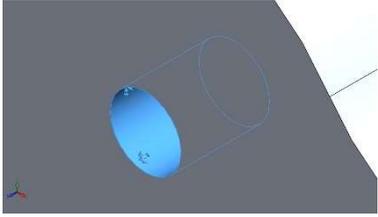
Unidades

| | |
|---------------------------------|------------------|
| Sistema de unidades: | SI (MKS) |
| Comprimento/Deslocamento | mm |
| Temperatura | Kelvin |
| Velocidade angular | Rad/s |
| Pressão/Tensão | N/m ² |

Propriedades do material

| Referência do modelo | Propriedades |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Nome: 6061-T6 (SS) Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Limite de escoamento: 2.75e+08 N/m² Resistência à tração: 3.1e+08 N/m² Módulo elástico: 6.9e+10 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.33 Massa específica: 2700 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 2.6e+10 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 2.4e-05 /Kelvin</p> |

Acessórios de fixação e Cargas

| Nome do acessório de fixação | Imagem de acessório de fixação | Detalhes de acessório de fixação | | |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|
| Fixo-1 |  | <p>Entidades: 1 face(s) Tipo: Geometria fixa</p> | | |
| Forças resultantes | | | | |
| Componentes | X | Y | Z | Resultante |
| Força de reação(N) | 4.46141e-05 | 0.00146617 | 0.000146501 | 0.00147415 |

| Nome da carga | Carregar imagem | Detalhes de carga |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Força-1 |  | <p>Entidades: 1 face(s) Tipo: Aplicar força normal Valor: 608 N</p> |

Informações de malha

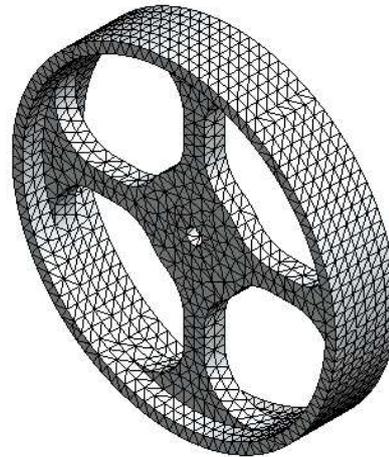
| | |
|----------------------|--------------|
| Tipo de malha | Malha sólida |
|----------------------|--------------|

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| Gerador de malhas usado: | Malha padrão |
| Pontos Jacobianos | 4 Pontos |
| Tamanho do elemento | 2.52262 mm |
| Tolerância | 0.126131 mm |
| Plotagem de qualidade de malha | Alta |

Informações de malha - Detalhes

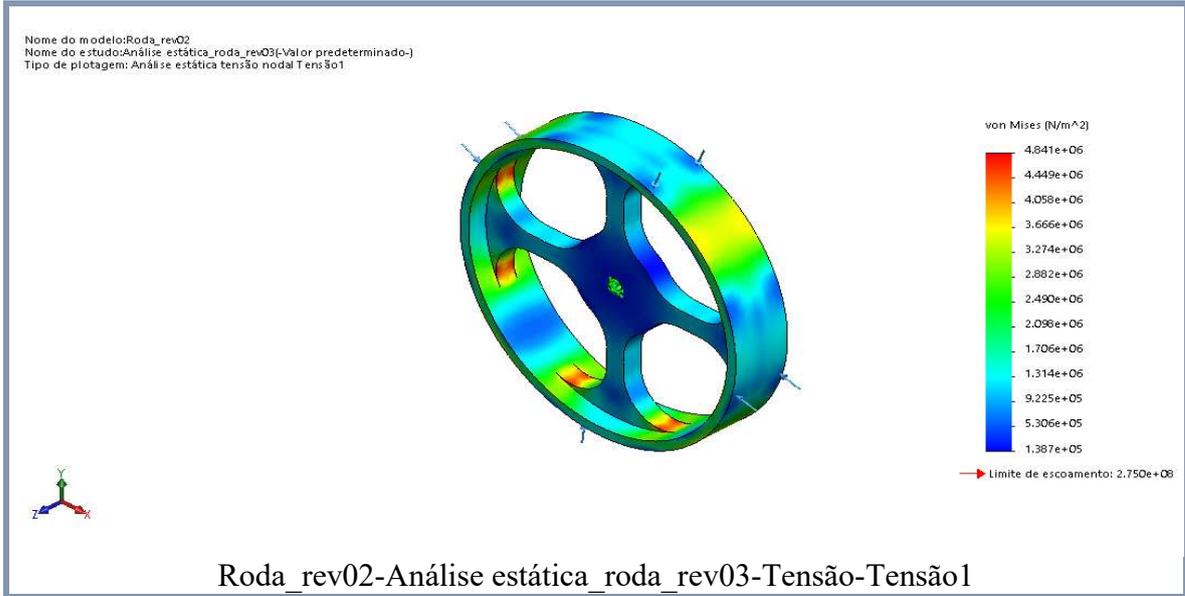
| | |
|--------------------------------------------------|----------|
| Total de nós | 15850 |
| Total de elementos | 8656 |
| Proporção máxima | 16.082 |
| % de elementos com Proporção < 3 | 98.5 |
| % de elementos com Proporção < 10 | 0.289 |
| % de elementos distorcidos(Jacobiana) | 0 |
| Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss): | 00:00:01 |

Nome do modelo: Roda_rev02
Nome do estudo: Análise estática_roda_rev03(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

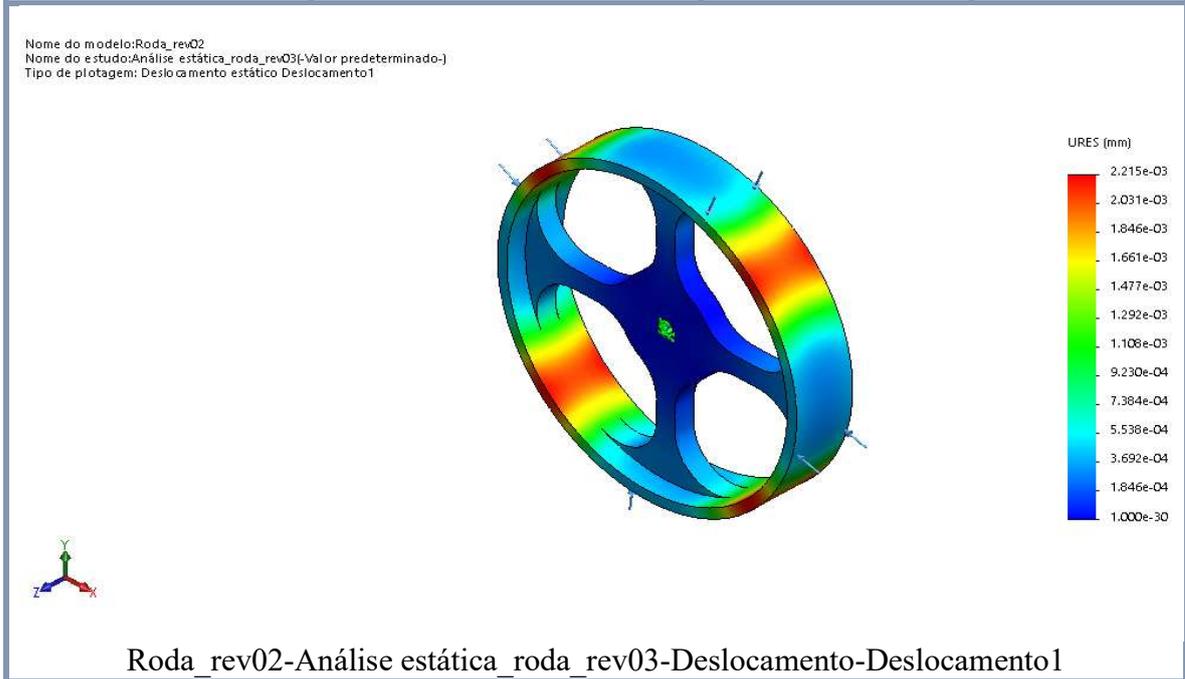


Resultados do estudo

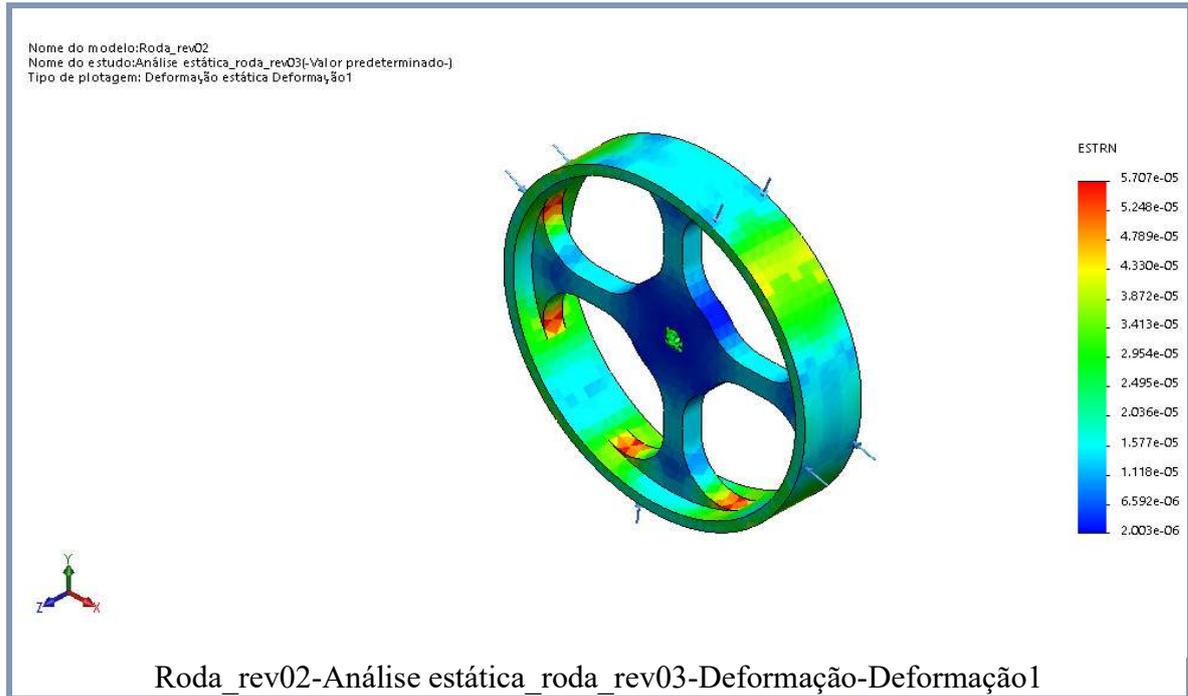
| Nome | Tipo | Mín. | Máx. |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| Tensão1 | VON: tensão de von Mises | 1.387e+05 N/m ² Nó: 15750 | 4.841e+06 N/m ² Nó: 1338 |



| Nome | Tipo | Mín. | Máx. |
|---------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Deslocamento1 | URES: Deslocamento resultante | 0.000e+00 mm Nó: 1 | 2.215e-03 mm Nó: 296 |



| Nome | Tipo | Mín. | Máx. |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Deformação1 | ESTRN : Deformação equivalente | 2.003e-06 Elemento: 3802 | 5.707e-05 Elemento: 4008 |



APÊNDICE D - SIMULAÇÃO DA CHAPA PRINCIPAL UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO

Informações do modelo

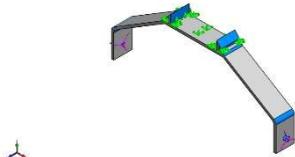
| Corpos sólidos | | |
|--------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nome e referência do documento | Tratado como | Propriedades volumétricas |
| Chapa-rev01.par | Corpo sólido | Massa:0.000133933 kg Volume:0.000110688 m ³ Densidade:1.21 kg/m ³ Peso:0.00131254 N |

Unidades

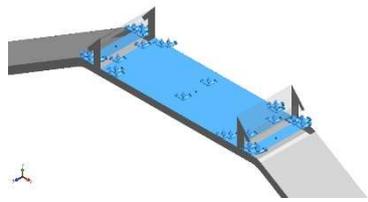
| | |
|-----------------------------|----------|
| Sistema de unidades: | SI (MKS) |
|-----------------------------|----------|

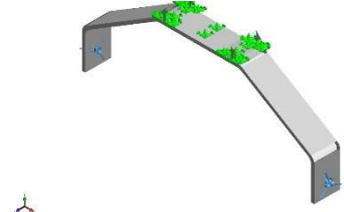
| | |
|---------------------------------|------------------|
| Comprimento/Deslocamento | mm |
| Temperatura | Kelvin |
| Velocidade angular | Rad/s |
| Pressão/Tensão | N/m ² |

Propriedades do material

| Referência do modelo | Propriedades |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Nome: TCC Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Limite de escoamento: 6e+08 N/m² Resistência à tração: 4.762e+08 N/m² Módulo elástico: 7e+10 N/m² Coeficiente de Poisson: 0 Massa específica: 1.21 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 5e+06 N/m²</p> |

Acessórios de fixação e Cargas

| Nome do acessório de fixação | Imagem de acessório de fixação | Detalhes de acessório de fixação | | |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|
| Fixo-1 |  | <p>Entidades: 3 face(s) Tipo: Geometria fixa</p> | | |
| Forças resultantes | | | | |
| Componentes | X | Y | Z | Resultante |
| Força de reação(N) | 2.19108e-06 | 7.08911e-07 | -2.50738e-06 | 3.40446e-06 |

| Nome da carga | Carregar imagem | Detalhes de carga |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Força-3 |  | <p>Entidades: 2 face(s) Tipo: Aplicar força normal Valor: 304 N</p> |

Informações de malha

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| Tipo de malha | Malha sólida |
| Pontos Jacobianos | 4 Pontos |
| Tamanho do elemento | 3.90231 mm |
| Tolerância | 0.195116 mm |
| Plotagem de qualidade de malha | Alta |

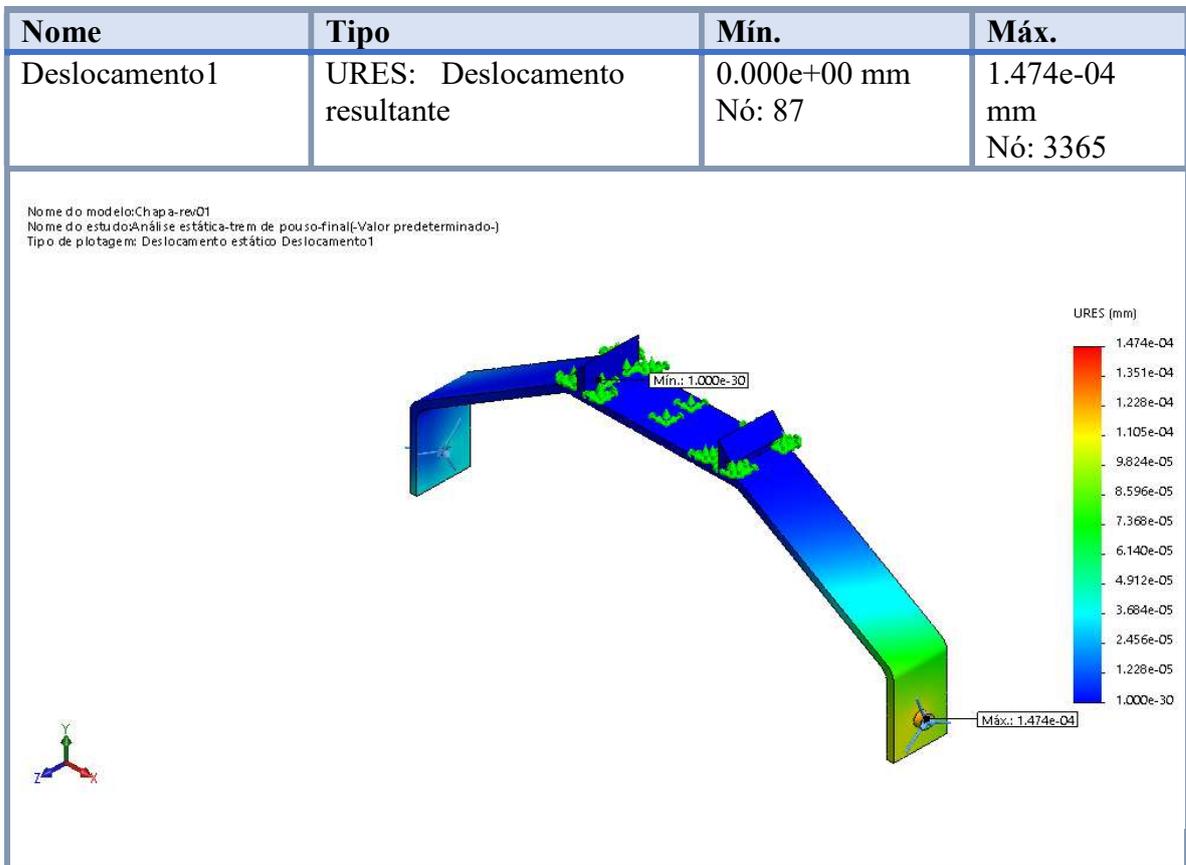
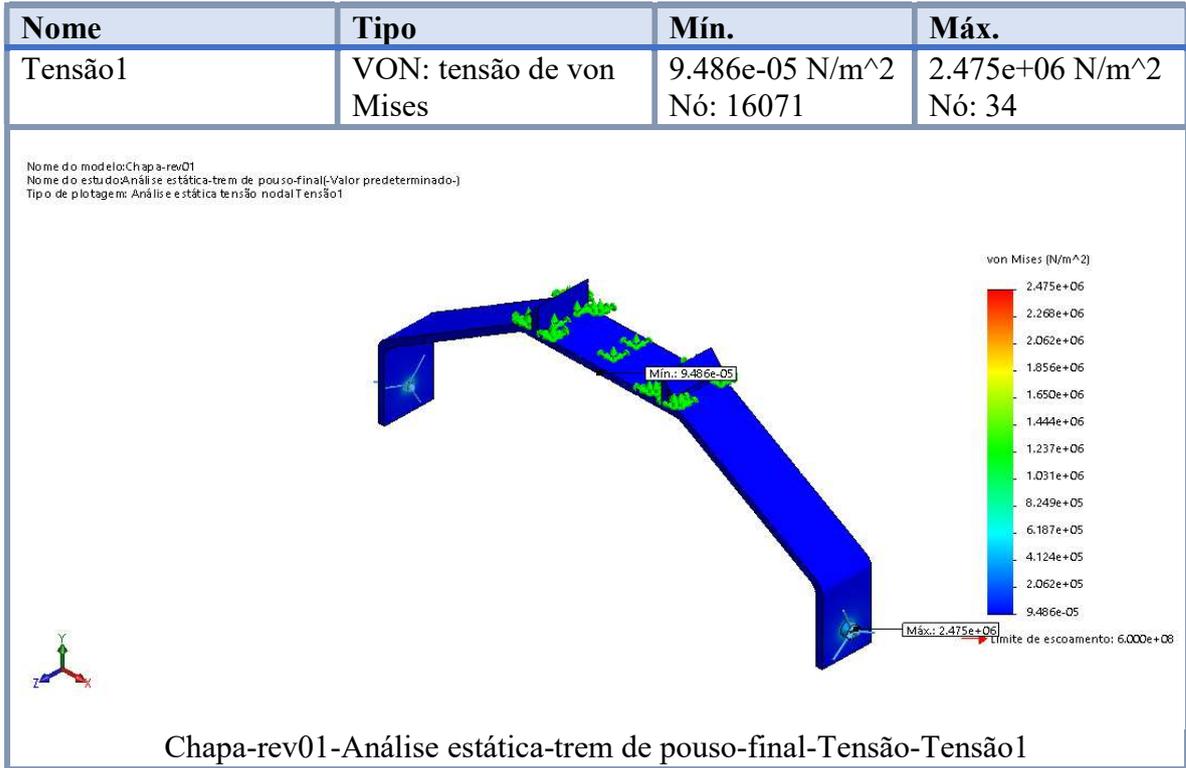
Informações de malha - Detalhes

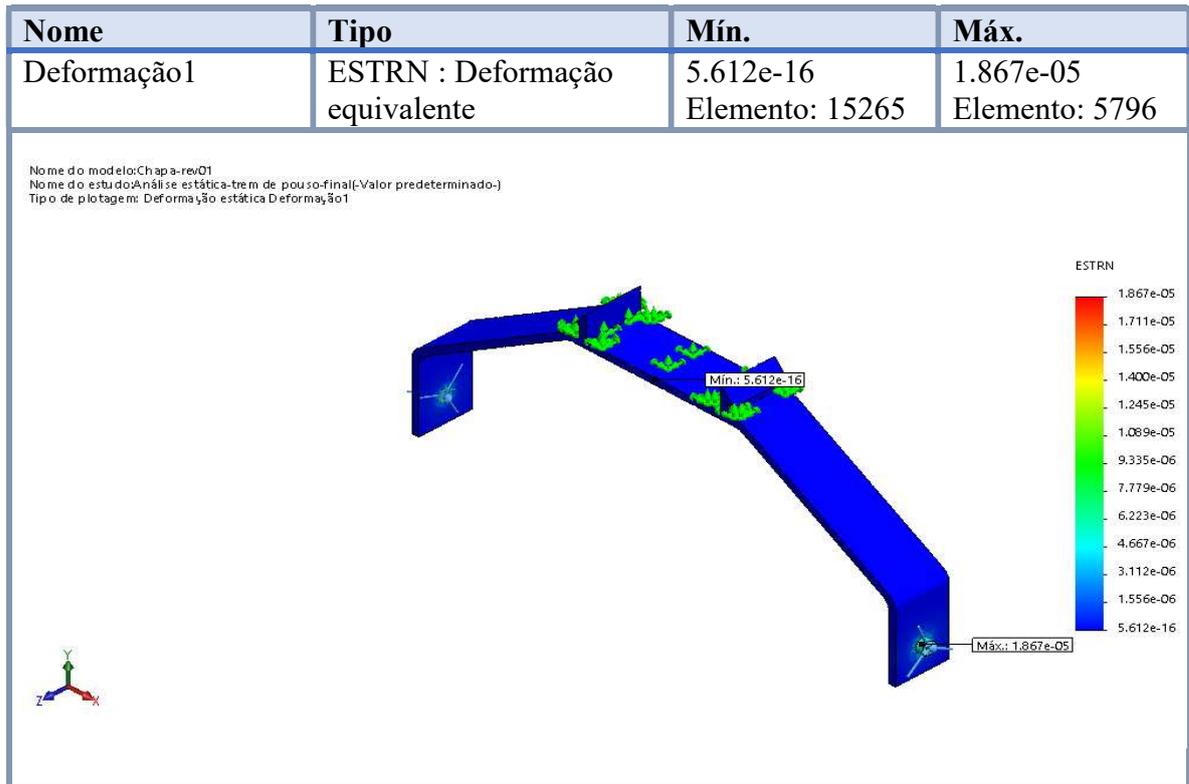
| | |
|------------------------------------------------------|----------|
| Total de nós | 29875 |
| Total de elementos | 17113 |
| Proporção máxima | 3.9059 |
| % de elementos com Proporção < 3 | 99.7 |
| % de elementos com Proporção < 10 | 0 |
| % de elementos distorcidos(Jacobiana) | 0 |
| Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss): | 00:00:05 |

Nome do modelo: Chapa-rev01
 Nome do estudo: Análise estática-trem de pouso-final(-Valor predeterminado-)
 Tipo de malha: Malha sólida

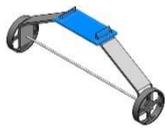
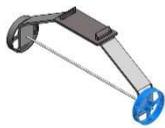
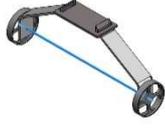


Resultados do estudo





APÊNDICE E - SIMULAÇÃO DE DROP TESTE DO TREM DE POUSO

| Corpos sólidos | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nome e referência do documento | Tratado como | Propriedades volumétricas |
| Corte-extrusão1  | Corpo sólido | Massa:10.9586 kg Volume:3.66e-05 m ³ Densidade:299416 kg/m ³ Peso:107.395 N |
| Chapa-rev01.par  | Corpo sólido | Massa:0.177101 kg Volume:0.000110688 m ³ Densidade:1600 kg/m ³ Peso:1.73559 N |
| Filete1  | Corpo sólido | Massa:0.0179596 kg Volume:1.60353e-05 m ³ Densidade:1120 kg/m ³ Peso:0.176004 N |
| Filete1  | Corpo sólido | Massa:0.0179596 kg Volume:1.60353e-05 m ³ Densidade:1120 kg/m ³ Peso:0.176004 N |
| Furos-guia com Ø2.0mm1  | Corpo sólido | Massa:0.0133219 kg Volume:4.93403e-06 m ³ Densidade:2700 kg/m ³ Peso:0.130554 N |

Propriedades do estudo

| | |
|----------------------------|-----------------|
| Nome do estudo | Drop test - TCC |
| Tipo de análise | Teste de queda |
| Tipo de malha | Malha sólida |
| Grande deslocamento | Ativada |

Informações de configuração

| | |
|----------------------------------------------|-----------------------|
| Tipo | Altura da queda |
| Altura da queda a partir do centróide | 1000 mm |
| Gravidade | 9.81 m/s ² |
| Referência de gravidade | Face<1> |
| Rigidez do alvo | Alvo rígido |
| Razão de amortecimento crítico | 0.5 |

Unidades

| | |
|---------------------------------|------------------|
| Sistema de unidades: | SI (MKS) |
| Comprimento/Deslocamento | mm |
| Temperatura | Kelvin |
| Velocidade angular | Rad/s |
| Pressão/Tensão | N/m ² |

Propriedades do material

| Referência do modelo | Propriedades |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Nome: Super denso Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Resistência à tração: 1.51658e+08 N/m² Resistência à compressão: 5.72165e+08 N/m² Módulo elástico: 6.61781e+10 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.27 Massa específica: 299416 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 5e+10 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 1.2e-05 /Kelvin</p> |
|  | <p>Nome: Fibra de carbono Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Limite de escoamento: 6e+08 N/m² Resistência à tração: 4.762e+08 N/m² Módulo elástico: 7e+10 N/m² Coeficiente de Poisson: 0 Massa específica: 1.21 kg/m³</p> |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Nome: PA Tipo 6 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Limite de escoamento: 1.03649e+08 N/m² Resistência à tração: 9e+07 N/m² Módulo elástico: 2.62e+09 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.34 Massa específica: 1120 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 9.704e+08 N/m²</p> |
|  | <p>Nome: Liga 6061 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Limite de escoamento: 5.51485e+07 N/m² Resistência à tração: 1.24084e+08 N/m² Módulo elástico: 6.9e+10 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.33 Massa específica: 2700 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 2.6e+10 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 2.4e-05 /Kelvin</p> |

Informações de contato

| Contato | Imagem do contato | Propriedades de contato |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Contato de componente-1 |  | <p>Tipo: Unido Componentes: 5 Corpos sólidos Opções: Malha compatível</p> |

Informações de malha

| | |
|-------------------------------------------------------------|--------------|
| Tipo de malha | Malha sólida |
| Gerador de malhas usado: | Malha padrão |
| Pontos Jacobianos | 4 Pontos |
| Tamanho do elemento | 2.83525 mm |
| Tolerância | 0.141763 mm |
| Plotagem de qualidade de malha | Alta |
| Refazer malha de peças falhas com malha incompatível | Ativada |

Informações de malha - Detalhes

| | |
|---------------------------|--------|
| Total de nós | 113266 |
| Total de elementos | 117417 |

| | |
|--------------------------------------------------|----------|
| Proporção máxima | 10851 |
| % de elementos com Proporção < 3 | 97.6 |
| % de elementos com Proporção < 10 | 0.162 |
| % de elementos distorcidos(Jacobiana) | 0 |
| Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss): | 00:00:14 |

Nome do modelo: Tem de pauco TCC_pauco_carga
Nome do estudo: Drop test - TCC(Valor predeterminado.)
Tipo de malha: Malha sólida

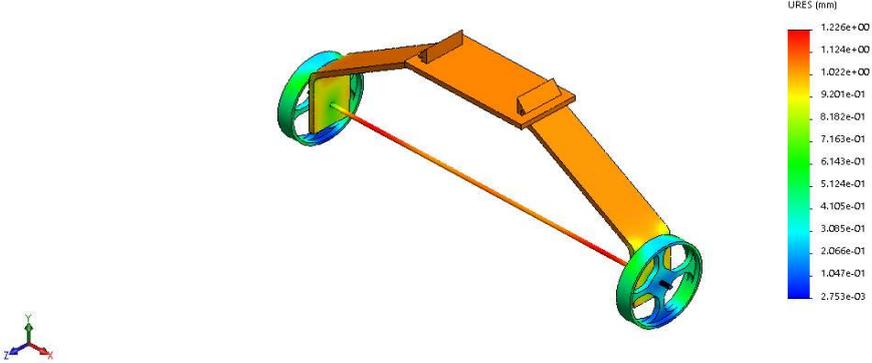


Informações do controle de malha:

| Nome do controle de malha | Imagem do controle de malha | Detalhes do controle de malha |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Controle-1 | <p style="font-size: x-small;">Nome do modelo: Tem de pauco TCC_pauco_carga Nome do estudo: Drop test - TCC(Valor predeterminado.) Tipo de malha: Malha sólida</p>  | <p>Entidades: 1 Corpos sólidos</p> <p>Unidades: mm</p> <p>Tamanho: 2.83525</p> <p>Taxa: 1.5</p> |
| Controle-2 | <p style="font-size: x-small;">Nome do modelo: Tem de pauco TCC_pauco_carga Nome do estudo: Drop test - TCC(Valor predeterminado.) Tipo de malha: Malha sólida</p>  | <p>Entidades: 1 Corpos sólidos</p> <p>Unidades: mm</p> <p>Tamanho: 2.83525</p> <p>Taxa: 1.5</p> |

| | | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Controle-3</p> |  | <p>Entidades: 2 Corpos sólidos Unidades: mm Tamanho: 2.83525 Taxa: 1.5</p> |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Resultados do estudo

| Nome | Tipo | Mín. | Máx. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Deslocamento1 | URES: Deslocamento resultante | 2.753e-03 mm Nó: 104869 | 1.226e+00 mm Nó: 109557 |
| <p>Nome do modelo:Trem de pouso TCC_rev02_carga Nome do estudo:Drop test - TCC(Valor predeterminado-) Tipo de plotagem: Deslocamento1 Etapa da plotagem: 25 tempo : 264.599 Microsegundos Escala de distorção: 1</p>  <p>Trem de pouso TCC_rev02_carga-Drop test - TCC-Deslocamento-Deslocamento1</p> | | | |

| Nome | Tipo | Mín. | Máx. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Deformação1 | ESTRN : Deformação equivalente | 2.200e-17 Elemento: 291 | 7.139e-02 Elemento: 12423 |
| <p>Nome do modelo:Trem de pouso TCC_rev02_carga Nome do estudo:Drop test - TCC(Valor predeterminado-) Tipo de plotagem: Deformação1 Etapa da plotagem: 25 tempo : 264.599 Microsegundos Escala de distorção: 1</p>  <p>Trem de pouso TCC_rev02_carga-Drop test - TCC-Deformação-Deformação1</p> | | | |

