



III Semana Acadêmica de Engenharia Mecânica e de Produção

“ENGENHARIA ALÉM DO TRADICIONAL E O IMPACTO DA INDÚSTRIA 4.0”

24 a 26 de setembro de 2018 no campus Viçosa da UFV
Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica – DEP
Universidade Federal de Viçosa – UFV

ETAPAS DE DIMENSIONAMENTO DE TREM DE POUSO TRICICLO PARA AERONAVES RÁDIO CONTROLADAS SAE *AERODESIGN*

Filipe Abdala Bento e Dantas de Moraes, Charles Luís da Silva

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica
Avenida Peter Henry Rolfs, Campus Universitário - 36570-900 - Viçosa - Minas Gerais
filipeabdalabento@hotmail.com, charles.silva@ufv.br

Resumo: A competição SAE Brasil *AeroDesign*, é um evento que ocorre anualmente desde 1999 na cidade de São Jose dos Campos, tendo por objetivo através de uma competição avaliar projetos e construção de aeronaves por alunos de Engenharia das mais diversas Universidades Brasileiras e do Exterior. Neste evento as aeronaves devem apresentar elevada eficiência estrutural e carregar o máximo possível de carga, obedecendo a certas restrições de projeto da competição. Os principais componentes estruturais de uma aeronave são Trem de Pouso, *Tail Boom*, Longarina e Fuselagem, que devem apresentar não somente propriedades características como rigidez e robustez, mas também boa relação entre peso e resistência. A equipe “*Skywards UFVoa*” da Universidade Federal de Viçosa visa aprofundar seus esforços no dimensionamento em materiais compósitos das partes mais importantes de uma aeronave, bem como métodos de fabricação mais eficazes. Este trabalho tem como objetivo demonstrar o dimensionamento de um Trem de Pouso que atenda as demandas do projeto da competição de 2018, bem como os testes para a validação do projeto.

Palavras-Chave: Trem de Pouso, Material Compósito, Dimensionamento.

1. INTRODUÇÃO

Um avião é definido como uma aeronave de asa fixa mais pesada que o ar, movida por propulsão mecânica, que é mantido em condição de voo devido à reação dinâmica do ar que escoar através de suas asas. São projetados para uma grande variedade de propostas, porém todos possuem os mesmos componentes principais (Rodrigues, 2010). Ao longo dos anos o avião vem se tornando um meio de transporte bem popular devido a velocidade de transporte e por ser também muito seguro, isso devido a esforços de engenheiros e estudiosos que sempre buscaram e ainda buscam entender os fenômenos que ocorrem com a aeronave e sua estrutura durante voo.

O interesse pela área aeronáutica é tão grande que muitos entusiastas buscam aprender mais sobre aeronaves através do aeromodelismo, muitas vezes fazendo deste seu hobby. Já estudantes de curso superior como futuros profissionais da engenharia que desejam atuar no mercado aeronáutico, reúnem-se no *aerodesign*. O projeto de *aerodesign* diferentemente de um aeromodelo, é uma aeronave também em escala reduzida, porém que busca completar missões de voo e carregar carga, apresenta componentes com uma necessidade de resistência estrutural muito maior e é projetado para situações mais críticas de voo, atendendo também a restrições de projeto apresentadas pela comissão da competição que normalmente estes estudantes estão escritos. No Brasil, estudantes de universidades de todo o país participam da competição SAE BRASIL *AeroDesign*.

Historicamente na competição SAE Brasil *AeroDesign*, o Trem de Pouso juntamente com fuselagem e longarina é um dos componentes que frequentemente apresenta falha no momento do voo, pois condições adversas na competição podem fazer com que estes componentes sejam fortemente solicitados. Sendo assim, tais componentes necessitam de cuidado especial na hora de seu dimensionamento e construção para garantir a equipe uma maior competitividade na competição.

O trem de pouso tem como objetivo dissipar a energia proveniente da descida vertical da aeronave em contato com o solo, suportar o peso estático da mesma e ainda ser projetado para resistir à operação de rolagem da aeronave na pista de pouso (Niu, 1995). Este trabalho tem como objetivo demonstrar uma das diversas maneiras de dimensionar e fabricar um trem de pouso.

2. METODOLOGIA

No desenvolvimento deste trabalho utilizou-se a bibliografia Pazmany (1963) e a norma FAR PART 23 para obtenção de alguns ângulos característicos e realização de ensaio seguindo uma normatização amplamente aceita. A sequência de execução dos passos foi definida pelos membros do setor de Estruturas de equipe “*Skywards UFVoa*”.

Para definir a geometria de um trem de pouso deve-se primeiro escolher qual será sua configuração, podendo ser triciclo ou convencional, pois tal configuração indica de maneira inicial a posição do trem de pouso principal e do trem de nariz. Após esta etapa é necessário escolher o diâmetro das rodas do seu conjunto, para que não ocorra de que alguma parte da geometria do trem principal encoste no solo e impossibilite as rodas de fazerem o mesmo.

A geometria do trem principal deve ser pensada junto com sua forma de fixação a fuselagem, para isto necessita-se que a fuselagem esteja pronta ou ao menos bem definida, para que não seja feita uma geometria impossível de conectar a fuselagem ou que se faça de maneira demasiadamente trabalhosa. Em seguida deve-se determinar as dimensões do trem principal para que este possa ser então construído e pôr fim a realização de *drop test* para validação da geometria obtida.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dimensionamento das rodas

Considerando o projeto como sendo um avião de transporte de carga com P_t = carga máxima = 11,9 kg, tem-se que o diâmetro das rodas deve ser 60 mm e a largura de 7 mm, feitas em liga de alumínio conforme exemplificado na Tab. 1. Visto que as aeronaves de *aerodesign* não são muito pesadas e nem muito altas, tal tamanho de roda se mostra satisfatório.

Tabela 1: Dimensionamento das rodas do trem principal. Adaptado de Raymer (1989).

	Diâmetro das rodas do trem principal (polegadas) $W_d = A(P_t n)^B$			
	Diâmetro		Largura	
	A	B	A	B
Aviação Geral	1,51	0,349	0,715	0,312
Comercial	2,69	0,251	1,17	0,216
Transporte	1,63	0,315	0,1043	0,48
Jatos	1,59	0,302	0,098	0,467

W_d = carga em uma roda

3.2 Fixação em fuselagem

A fuselagem do presente trabalho foi do tipo treliçada conforme Fig. 1, para a fixação do trem principal foi idealizada uma peça composta por dois retângulos que apresentam um rasgo em uma de suas extremidades para o encaixe do mesmo, mantendo o resto dos retângulos todo preenchido até a outra extremidade, a qual encosta na placa presente na parte traseira da fuselagem. A fim de fixar o

trem de pouso e torna-lo cambiável entre aeronaves, foi adicionada uma placa composta por um “sanduiche” de madeira balsa e fibra de carbono entre os retângulos conforme Fig.1. A fixação do conjunto de encaixe foi feita amarrando o mesmo a fuselagem utilizando fios de fibra de carbono juntamente com resina epóxi, o que dificulta o cálculo de resistência da fixação, já que as fibras estão dispostas em direções aleatórias. A montagem do conjunto pode ser observada na Fig. 2.

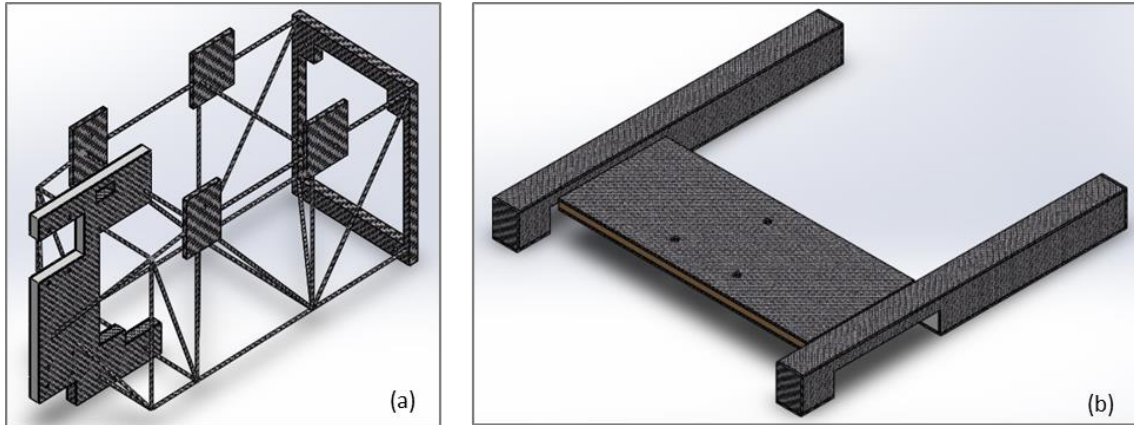


Figura 1: (a) vista isométrica fuselagem; (b) vista isométrica do encaixe do trem de pouso.

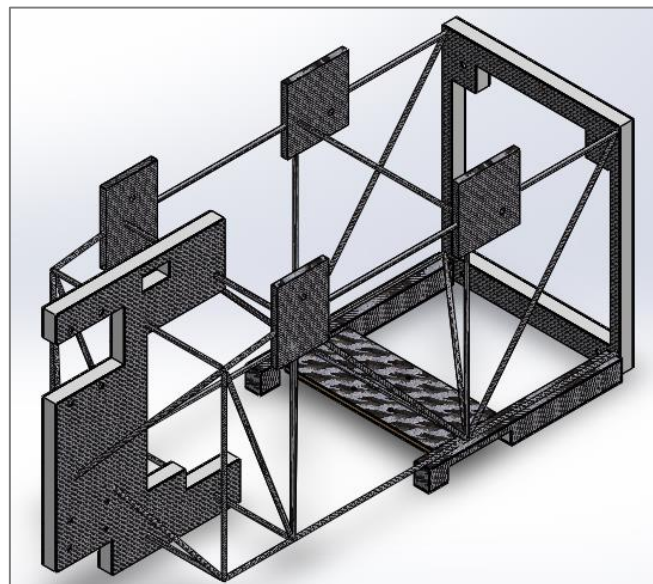


Figura 2: Montagem do conjunto.

3.3 Geometria e fabricação do trem de pouso

O trem de pouso principal foi pensado para ser no modelo que se assemelha a uma viga engastada. Tal semelhança foi alcançada utilizando uma placa de sanduiche de Espuma de PVC Divinycell H45[®] com fibra de carbono como apoio e um eixo como elemento engastado. Na Tab. 2 são descritos todos os materiais utilizados para a fabricação.

Tabela 2: Materiais e descrição.

Materiais	Descrição
Tecido fibra de carbono trama plana	2 camadas por face
Tubo maciço de fibra de carbono	Diâmetro 8 mm
Parafuso Allen aço liga	2 M5
Espuma de pvc divinycell h45 [®]	1 Placa
Resina epóxi ampreg	Proporções do fabricante

O processo de fabricação teve início na preparação de uma placa de sanduiche de espuma PVC Divinycell H45[®] com duas camadas de fibra de carbono em cada face como pode ser observado pela Fig. 3(a). Em seguida cortou-se do tubo de fibra de carbono um comprimento igual ao da placa sanduiche. A fim de melhorar a área de contato entre os componentes, foi feito um pequeno aplainamento no eixo, visto que o mesmo seria unido a placa utilizando resina, fez-se necessário tal aumento de superfície de contato para garantir uma maior aderência do eixo a placa. Na Fig. 3(b) a seguir é possível observar o aplainamento que se encontra destacado.

O planejamento inicial era unir o eixo com o rolamento das rodas através de um ajuste por interferência, porem devido ao baixo coeficiente de atrito proporcionado pelo carbono do eixo esta não era mais uma alternativa viável. Encontrou-se como solução a adição de parafusos nas pontas do eixo, sendo necessário aumentar a superfície de contato tanto no eixo quanto nos parafusos, sendo tais superfícies obtidas com o uso de lima e esmeril respectivamente, é possível observar o resultado final do eixo na Fig. 3(c).

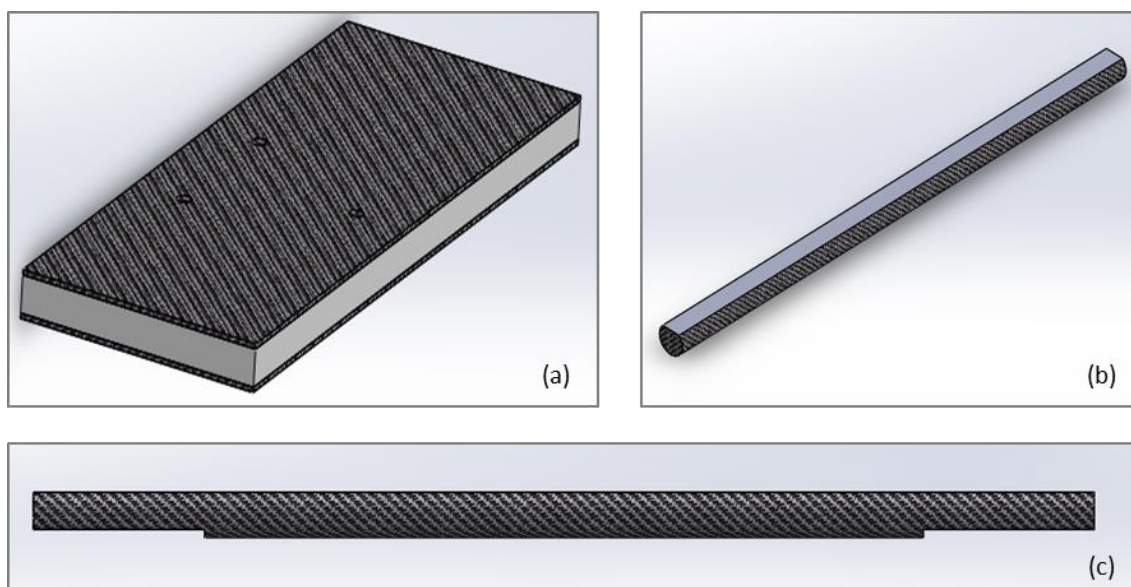


Figura 3: (a) placa de sanduiche; (b) eixo com superfície planificada destacada; (c) aumento de superfície de contato para parafusos.

Os parafusos escolhidos foram esmerilhados até o início de suas roscas e fixados ao eixo sendo amarrados com fios de fibra de carbono e resina depositada sobre os fios, já o eixo teve resina aplicada diretamente na superfície de contato e em seguida foi colocado em contato com a placa.

A fim de dar uma maior rigidez ao sistema e garantir que o eixo não se separasse da placa, cortou-se um retângulo de fibra de carbono com as dimensões exatas para encaixar entre os parafusos e que também desse três voltas ao redor da placa. Após aplicar resina na fibra de carbono, o conjunto em questão foi colocado em um saco a vácuo para melhorar a aderência no conjunto placa/eixo durante o processo de cura da resina e para retirar excesso de resina. O resultado final em vista superior pode ser observado na Fig. 4 e a vista inferior na Fig. 5.



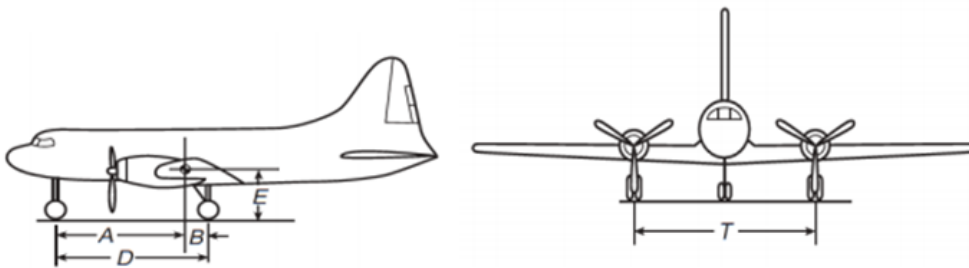
Figura 4: Resultado final parte inferior.



Figura 5: Resultado final vista superior.

3.4 Dimensões do trem de pouso

Para se obter as dimensões do trem principal, algumas distâncias e as coordenadas do centro de gravidade da aeronave devem ser consideradas. A Fig. 6 exemplifica a obtenção de tais distâncias.



- A = distância entre o cg da aeronave e o trem de pouso frontal [m]
- B = distância do cg da aeronave e o trem de pouso principal [m]
- D = distância total entre eixos [m]
- E = altura do cg em relação ao solo (h_{cg}) [m]
- T = *Track* (distância entre rodas do trem de pouso principal da aeronave)

Figura 6: Distâncias para dimensionamento de trem de pouso.

Overtuning é o rolamento lateral da aeronave, ocasionado por ventos laterais durante o pouso. Segundo (Torenbeek, 1982) o ângulo de *overtuning* pode ser facilmente obtido através de uma simples regra de polegar, não devendo exceder 60° , porém, experimentalmente foi estabelecido como limite de segurança aceitável um ângulo entre 55° e 57° , para evitar o rolamento lateral da aeronave.

Segundo Roskam (1958) e Pazmany (1963), quando observado em vista lateral, o ângulo de toque entre as rodas do trem principal e o solo deve ser de 15° em relação ao centro de gravidade, obtendo-se assim a distância entre centro de gravidade e ponto onde as rodas tocam o solo. A Fig. 7 demonstra a obtenção da distância do ponto de toque ao centro de gravidade em função da distância $E = 14,3$ cm e do ângulo de 15° utilizando a Eq (1).

$$\operatorname{tg} 15 = \frac{x}{14,3} \rightarrow x = 3,83\text{cm} \quad (1)$$

Logo as rodas do trem principal tocarão o solo a 3,83 cm do centro de gravidade da aeronave. A Fig. 8 exemplifica a posição do ângulo de *overtuning*, ao substituir E, A e B nesta figura, chega-se a um valor de track mínimo de $T = 7,66$ cm, porém, como a dimensão da fuselagem é maior que T mínimo, optou-se então por utilizar $T = 16,6$ cm.

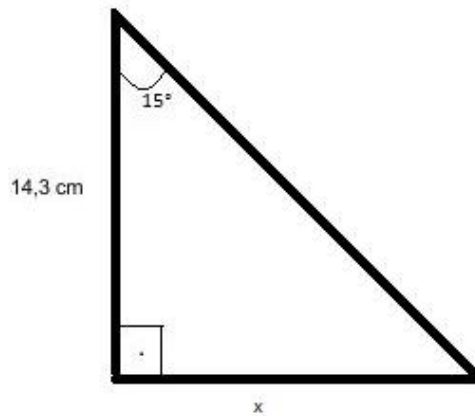


Figura 7: Demonstração da distância do ponto de toque ao cg.

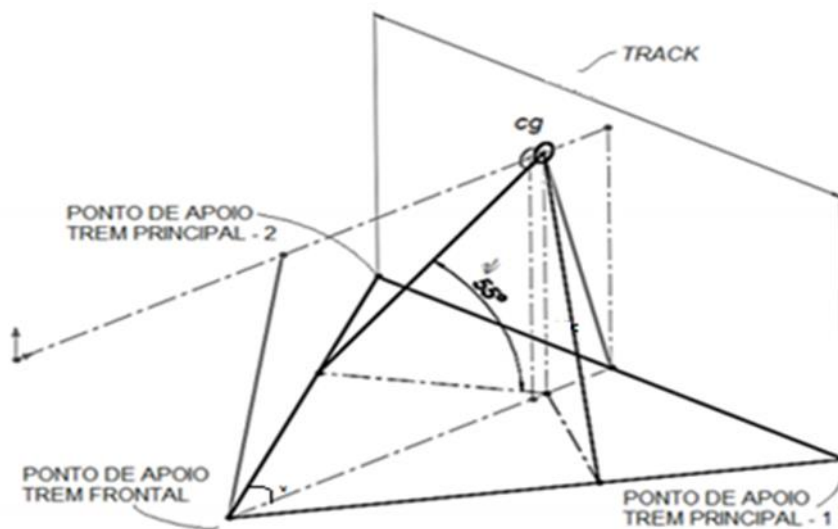


Figura 8: Posição do ângulo de *overturning*.

3.5 Validação por *drop test*

A competição SAE Brasil *AeroDesign* exige relatórios de projeto de todos os setores das equipes competidoras. No caso do setor de estruturas, um teste muito importante para validação do projeto é o *drop test* de trem de pouso. Tal teste consiste em colocar carga sobre o componente e abandoná-lo de certa altura, visando simular uma situação crítica de pouso, para analisar o quanto de carga o trem de pouso será capaz de suportar. Este teste foi executado seguindo a norma FAR PART 23 para a determinação da altura que o componente deve ser abandonado para sua validação. A Eq. (2) demonstra como esta altura é obtida.

$$h(\text{polegadas}) = 3.6 \left(\frac{W}{S}\right)^{1/2} \quad (2)$$

Sendo $W = \text{MTOW} = 11,9 = 78,7050 \text{ lbs}$ e $S = \text{Área da asa} = 0,8568 \text{ m}^2 = 9,22 \text{ ft}^2$, obteve-se um h de 15,6 in (39,62 cm), para fins de praticidade adotou-se $h = 40 \text{ cm}$. A norma também estabelece que a altura mínima de soltura deve ser de 9,2 in (23 cm) e a máxima de 18,7 in (48 cm).

A fim de quantificar as forças que o componente estará sujeito, faz-se necessário o uso de um acelerômetro. Utilizando a segunda lei de Newton e os dados obtidos do sensor é possível verificar nas Fig. 9 e Fig. 10 as cargas em Newton que agem no trem principal.

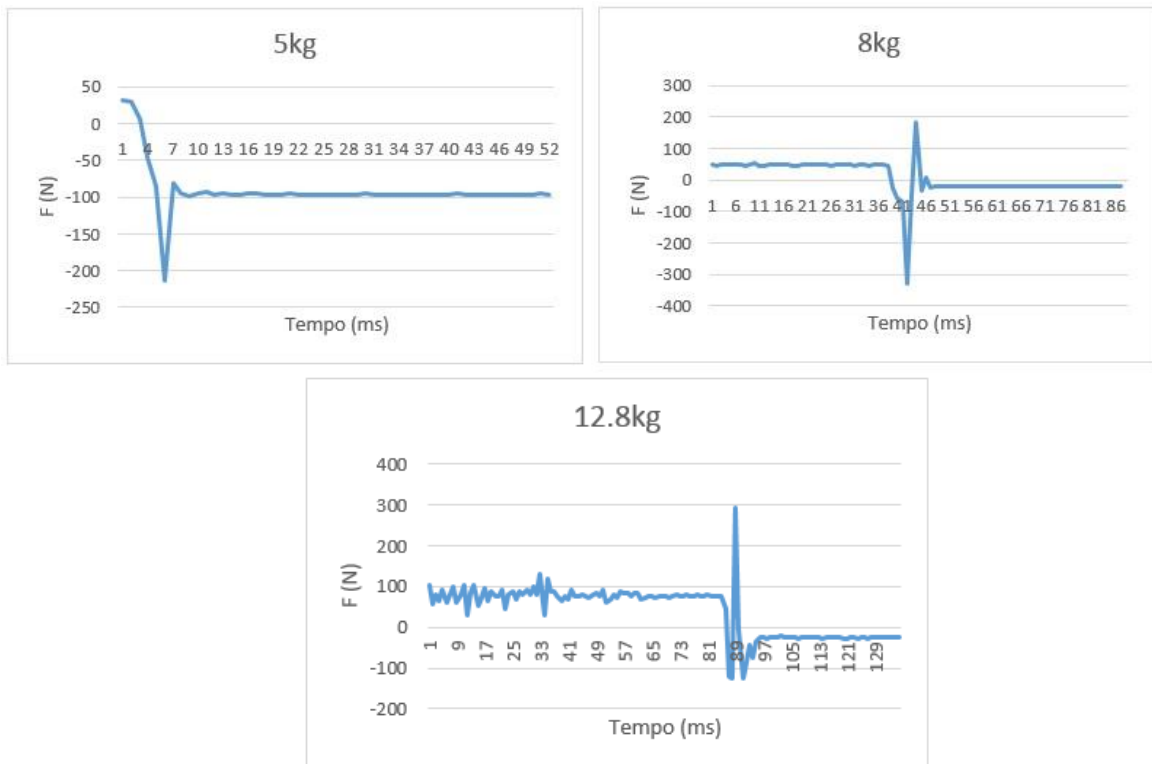


Figura 9: Carga em trem de pouso *drop test* 5 kg; carga em trem de pouso *drop test* 8 kg; carga em trem de pouso *drop test* 12,8 kg.

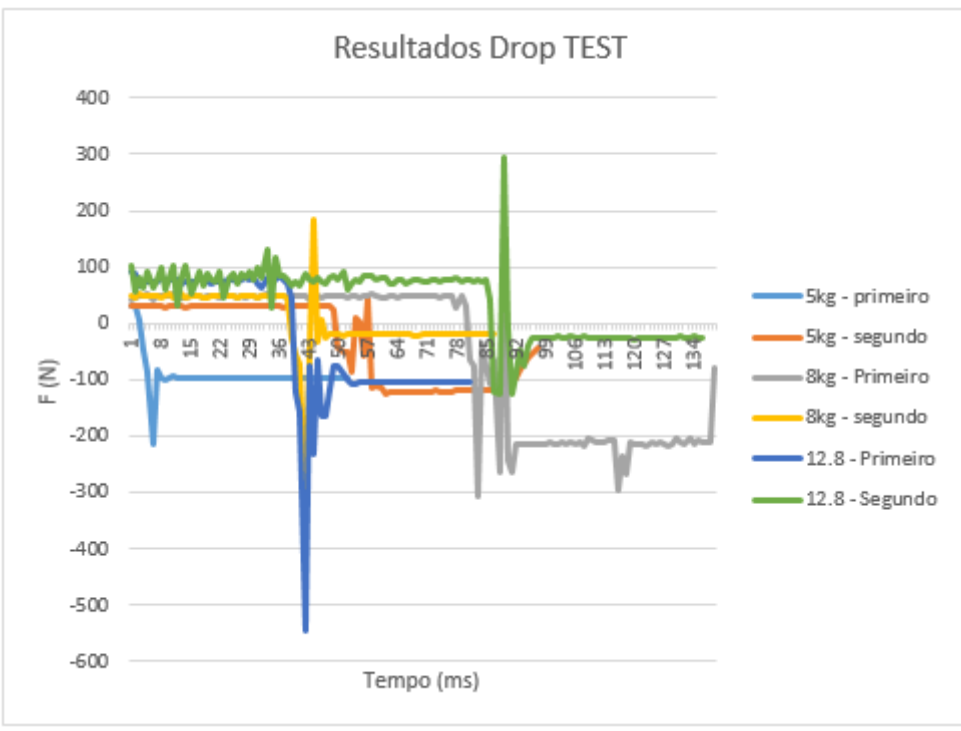


Figura 10: Resultados *drop test*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho apresentou todo o processo de projeto e construção de um trem de pouso que foi realizado pela equipe “Skywards UFVoa” da Universidade Federal de Viçosa para o projeto de 2018 que participou da 20ª Competição SAE Brasil AeroDesign. Como os resultados alcançados conclui-se que:

- A fixação do trem de pouso em uma aeronave de fuselagem treliçada deve ser projetada juntamente com a geometria do trem principal, pois projetar conexões para fixação neste tipo de fuselagem se dá de maneira mais trabalhosa, logo a fixação já deve ser idealizada para acomodar perfeitamente a geometria definida para o trem de pouso;
- A utilização de um eixo de carbono com o comprimento exato da placa sanduiche elimina a ocorrência de um braço de alavanca que geraria um momento sobre o eixo, logo o mesmo seria mais solicitado. Mesmo com a adição de parafusos na extremidade, o braço de alavanca gerado pela utilização de porcas auto-travante para fixação das rodas é mínimo, pois a rosca dos parafusos começa justamente na extremidade do eixo;
- Tal geometria de trem principal mostrou-se de fácil fabricação, pois todos seus componentes são de geometria simples. A maior parte do tempo demandado para a finalização da fabricação se deve ao tempo de cura da resina, utilizada em vários componentes e etapas do processo de fabricação.

5. REFERÊNCIAS

- ARAUJO, E. “Modelando Materiais Compostos Laminados com o Ansys V15”, Disponível em: <http://library.esss.com.br/analise_materiais_compositos_tk.>, acessado em: 15/11/2018.
- FAR Part 23 “Airworthiness standards: normal, utility, acrobatic and commuter”.
- FÉLIX, P. H. W. “Caracterização mecânica de matérias compostos”. Minas gerais: UFV, 2013. 28p.
- ISCOLD, P. “Introdução às cargas nas Aeronaves” EE UFMG, Centro de Estudos Aeronáuticos, 2011.
- NIU, M. C-Y. “Airframe Stress Analysis and Sizing. Second Edition”, Hong Kong Conmilit Press LTD, 1999.
- NIU, M. C. Y. “Airframe Structural Design”. Second Printing, Conmilit Press LTD, 1989.
- PAZMANY, L. “Light Airplane Design”, San Diego, California, 3ª Edição, 1963.
- RAYMER, D. P. “Aircraft Design: A Conceptual Approach”, Third Edition AIAA – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- RODRIGUES, L. E. M. J. “Fundamentos da Engenharia Aeronáutica – Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign”. Volume Único. 1. ed rev. – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2011.