

## **Projeto Estrutural de um Trem de Pouso para uma Aeronave Rádio-Controlada**

ASSUMPCÃO, M. E.<sup>1</sup> ; NACIF, G. L.<sup>2</sup>; PANZERA, T. H.<sup>3</sup> ; CHRISTOFORO, A. L.<sup>4</sup>

Universidade Federal de São João Del Rei – UFSJ – Departamento de Engenharia  
Mecânica, São João Del-Rei, CEP: 36307-352, Minas Gerais

E-mail: <sup>1</sup>meassumpcao@yahoo.com.br

E-mail: <sup>2</sup>glauciolaun@yahoo.com.br, <sup>3</sup>tuliopanzera@hotmail.com, <sup>4</sup>alchristoforo@yahoo.com.br

**Resumo.** *O evento SAE Aerodesign acontece anualmente em São José dos Campos desde 1999, visando à competição entre aeronaves de pequeno porte construídas por equipes de alunos de graduação em Engenharia das principais Universidades Brasileiras e do Exterior. A aeronave deve apresentar elevada eficiência estrutural e carregar o máximo possível de carga, atendendo as exigências de projeto da competição. A equipe “Trem Ki Voa” da Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ) participou da competição de 2009 projetando uma aeronave monoplano de asa alta e empenagem bi-plana, com trem de pouso triciclo. Este trabalho apresenta o projeto estrutural do trem de pouso, materiais e os respectivos processos de fabricação, utilizando o método de elementos finitos e ensaios mecânicos para verificação e validação do dispositivo. Além das características estruturais, o trem de pouso deve apresentar uma combinação adequada entre fator de amortecimento e mínima deformação sob carregamento máximo. O método de seleção foi fundamental na escolha do material, garantido as melhores propriedades do compósito híbrido. Os modelos bidimensionais e unidimensionais apresentaram resultados próximos. A metodologia adotada mostrou-se fundamental para a obtenção de uma estrutura com desempenho desejável, além de facilitar o desenvolvimento de futuros projetos.*

**Palavras chaves:** *Trem de pouso, aerodesign, elementos finitos, materiais compósitos.*

## 1. INTRODUÇÃO

A SAE Brasil (Sociedade de Engenheiros da Mobilidade) trouxe dos EUA em 1999 a competição SAE Aerodesign que propõe aos estudantes de engenharias, física e ciências aeronáuticas o desafio de projetar e construir um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado). Além disso, este evento visa propiciar o intercâmbio e a difusão de técnicas e conhecimentos na área de engenharia aeronáutica.

As equipes se dividem em três classes de projeto: regular, aberta e micro. A competição divide-se em duas etapas distintas para avaliação do projeto e do desempenho da aeronave. Dentre os principais quesitos analisados na etapa de projeto estão: aerodinâmica, estabilidade e controle, análise estrutural e desempenho. A segunda etapa consiste na competição propriamente dita, onde a aeronave é testada, em sucessivas baterias, transportando cargas úteis sempre crescentes, até as condições limites de cada projeto, sendo o vôo controlado e tendo 61 metros para decolagem.

A equipe Trem Ki Voa da UFSJ, constituída por alunos de graduação em engenharias mecânica e elétrica participam desde 2001 da competição SAE Aerodesign. Nos últimos dois anos (2008 e 2009) a equipe ficou entre as dez melhores equipes do país, terminando a competição em nono lugar, entre uma média de setenta competidores nestas duas últimas edições da SAE Aerodesign.

A análise estrutural representa uma das etapas mais importantes do projeto, sendo fundamental para a segurança em vôo. No ano de 2008 o desempenho do trem de pouso foi fundamental para o desempenho da aeronave. De acordo com Silva Junior (2004), o trem de pouso basicamente tem as funções de dissipar energia de impacto durante o pouso e de prover os meios de manobra da aeronave em solo.

Na competição de 2008, um compósito laminado de matriz polimérica reforçada com fibras de aramida (kevlar®) foi utilizado na fabricação do trem de pouso, exibindo elevadas deflexões, tornando a aeronave instável, além de limitar o levantamento da carga estimada no projeto. A elevada deflexão do componente promove a mudança do ângulo de ataque para a qual a aeronave foi projetada, diminuindo sua eficiência aerodinâmica.

Em 2009, a equipe de Aerodesign da UFSJ empenhou-se em projetar um novo trem de pouso para a aeronave. Este projeto tem como principais exigências as características de baixa densidade específica do material e rigidez moderada. A rigidez e resistência do material devem ser suficientes para garantir a segurança da aeronave, ou seja, a capacidade de não ocorrer falha catastrófica do trem de pouso durante o procedimento de decolagem e aterrissagem, como também, ser capaz de demonstrar falhas parciais em sua estrutura em função do tempo de uso.

Este trabalho objetiva apresentar a metodologia utilizada na criação do trem de pouso, enfatizando a caracterização dos materiais empregados assim como da importância da análise numérica na verificação do seu desempenho mecânico, permitindo o aperfeiçoamento deste componente estrutural por parte das equipes que venham a representar a UFSJ em eventos correlatos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A seqüência adotada para o desenvolvimento deste estudo foi:

- seleção dos materiais (compósito);
- caracterização dos compósitos;
- determinação das suas proporções na fabricação do trem de pouso;
- simulação numérica do trem de pouso através de elementos finitos uni e bidimensionais;
- ensaio mecânico da estrutura para validar a eficiência da abordagem numérica utilizada.

## 2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais compósitos estudados neste trabalho são os de fase matriz polimérica de epóxi e a fase dispersa de fibras bidirecionais de aramida e carbono. Em alguns casos as fibras foram usadas em conjunto, formando um compósito híbrido.

Segundo Daniel (1994) um compósito híbrido tem como objetivo combinar propriedades de dois ou mais materiais. Assim, torna-se possível obter um compósito que agregue as melhores propriedades de cada material.

Diversas frações e disposições de camadas (condições) foram inicialmente propostas para fabricação dos corpos-de-prova (ver figura 1), assim como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Disposição das camadas e dos materiais segundo as condições propostas.

Condição	Disposição das camadas	Materiais
C1	100% K	K (Kevlar®)
C2	100% C	C (Carbono)
C3	0,5C em cima - 0,5K em baixo	50% Carbono+50% Kevlar®
C4	0,3C em cima - 0,5K centro - 0,2C em baixo	
C5	0,2C em cima - 0,5K centro - 0,3C em baixo	
C6	0,3C em cima - 0,7K em baixo	30% Carbono+70% Kevlar®

Os compósitos foram laminados de acordo com a técnica wet-lay-up, em uma espessura de dois milímetros. Após o período de cura de sete dias em temperatura ambiente, os corpos de prova foram cortados nas dimensões 100 por 10 mm, obtendo cinco amostras por condição experimental.

O ensaio mecânico de flexão em três pontos foi realizado segundo as recomendações da norma Britânica EN 2662. Utilizou-se uma da máquina de ensaios universal EMIC-DL500 com célula de carga de 500N (ver Figura 2).

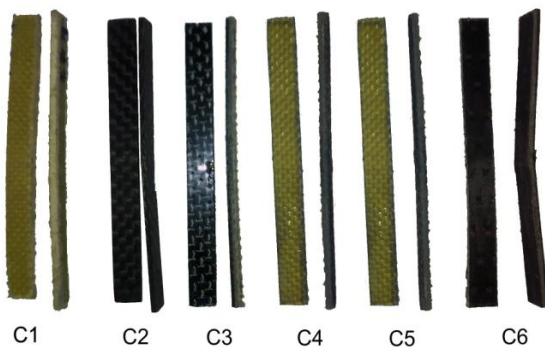


Figura 1 – Corpos de prova ensaiados



Figura 2 – Máquina de ensaios

## 2.2. SELEÇÃO DOS MATERIAIS

A adequada seleção dos materiais a serem utilizados na construção do trem de pouso, contou com o auxílio da equação 1.

$$m = 75PL \left( \frac{\rho}{\sigma} \right) \tag{1}$$

A equação 1 é elaborada segundo o rearranjo algébrico da equação de deflexão máxima em um modelo de viga bi-apoiada com carregamento pontual aplicado no meio do vão, juntamente com o valor da máxima tensão normal de flexão, da máxima deformação longitudinal e da densidade do material, sendo  $P$  a intensidade da força aplicada,  $L$  a largura da peça (maior das dimensões da seção transversal),  $\rho$  a densidade do material e  $\sigma$  a tensão normal devido à flexão. Esta equação indica que os materiais mais adequados para a fabricação de um trem de pouso leve, tendo baixa densidade específica e elevada resistência a flexão, são aqueles que admitem os menores valores possíveis para a razão

$\rho/\sigma$ . Segundo Callister (2007), o inverso desta razão (critério de escolha) é tomado como um índice de desempenho ( $D$ ), dessa forma, quanto maior o índice, mais adequado é o respectivo material.

### 2.3. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

A definição da configuração da aeronave depende da escolha do tipo de trem de pouso, sendo esta uma das premissas de projeto. Segundo Barros (2001) a configuração *triciclo fixo* apresenta como vantagem grande facilidade de pouso (Figura 3), sendo esta adotada no projeto Aerodesign 2009. A dimensão da bitola do trem de pouso foi determinada através do ângulo de *turnover*, Raymer (1992). A altura foi definida com base em projetos anteriores, onde a mínima distância entre a ponta da hélice e o solo deve ser de dois centímetros. Deste modo obteve-se a altura do trem de pouso subtraindo a distância do solo até a estrutura da aeronave, pelo diâmetro da roda, assim como ilustra a figura 4.



Figura 3 – Aeronave TKV 2009 com Trem de pouso em configuração triciclo fixo.

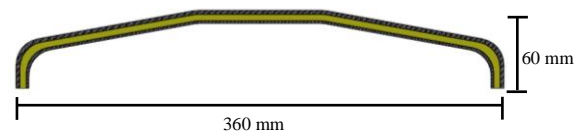


Figura 4 – Geometria 3D obtida.

### 2.4. CONDIÇÕES DE PROJETO

Segundo os regulamentos da competição uma aeronave da classe regular não pode exceder a carga máxima de 20 Kg. No projeto de 2009 a aeronave foi projetada para voar com no máximo 14,5 Kg. Segundo Barros (2001), a carga de dimensionamento é igual ao produto entre a massa total da aeronave, aceleração da gravidade, o fator de segurança e o fator de qualidade do material. O fator de segurança é definido como sendo igual a 1,2, valor utilizado pela equipe “Trem Ki Voa” há alguns anos, e um fator de qualidade igual a 1,15, correspondente a classe dos materiais compósitos.

A deformação do trem pouso durante a corrida de decolagem tem grande influência sobre a eficiência aerodinâmica do projeto. Grandes deflexões podem acarretar em perdas na eficiência aerodinâmica e assim aumentar a distância de decolagem do avião, devido a um aumento do arrasto gerado pela asa. Neste projeto, estipulou-se que a deflexão do trem de pouso na condição de carga máxima não deveria exceder três milímetros.

### 2.5. AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO TREM DE POUSO

A abordagem numérica para a análise do desempenho mecânico do trem de pouso foi realizada por intermédio de duas metodologias distintas de cálculo, uma considerando-se elementos finitos bidimensionais e a outra considerando os elementos finitos unidimensionais (elementos de barra), a fim de verificar a eficiência de ambas. As simulações numéricas foram realizadas utilizando o software comercial ANSYS®.

Para a análise em duas dimensões, adotou-se um modelo bidimensional disposto em camadas (ver figura 5), utilizando o elemento PLANE183 (ver figura 6). Este elemento

possui versões de elementos quadrados e triangulares, com um número de oito e seis nós respectivamente, possuindo dois graus de liberdade para cada nó. As recomendações do programa indicam o elemento para análise em estado plano de tensão e deformação. A espessura e as propriedades dos materiais, como módulos de elasticidades e coeficientes de Poisson, são variáveis de entrada. Nesta análise adotou-se a geometria triangular para o elemento finito.

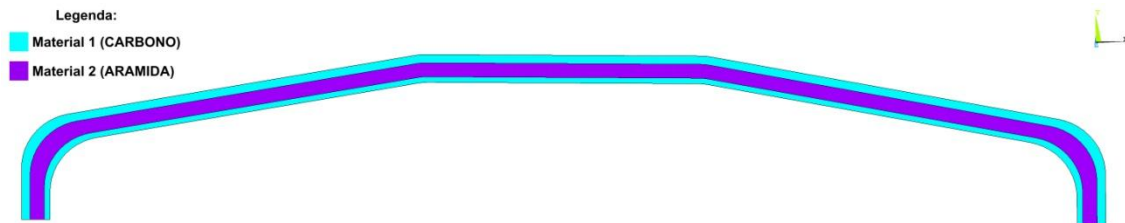


Figura 5 – Modelo disposto em camadas

O elemento utilizado no modelo de vigas foi o BEAM3, um elemento unidimensional que possui como características três graus de liberdade para cada nó, sendo dois nós para cada elemento (figura 7). As variáveis de entrada são a área da seção transversal, o momento de inércia e as propriedades do material.

Neste método foi proposto o emprego do módulo de elasticidade equivalente, obtido através dos ensaios de flexão do compósito escolhido, diferentemente do modelo anterior que consistia em separar as camadas dos materiais, analisando as propriedades individuais de cada material. Por se tratar de um elemento uniaxial, a definição da geometria consistiu em linhas onde suas coordenadas foram localizadas no centro geométrico da área da seção transversal garantindo a comparação dos resultados dos modelos propostos.

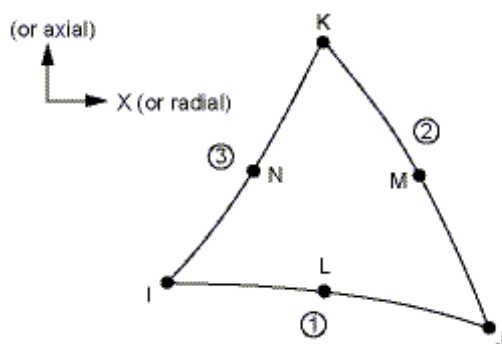


Figura 6 – Elemento PLANE183

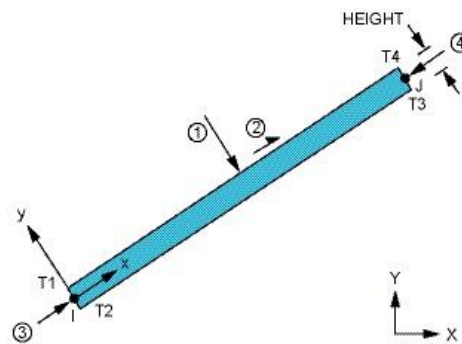


Figura 7 – Elemento BEAM3

## 2.6. CONSTRUÇÃO E ENSAIO

O molde para fabricação do trem de pouso foi construído em madeira devido seu baixo custo. A técnica empregada para a laminação das camadas foi a mesma utilizada na confecção dos corpos de prova. Depois de laminado o mesmo foi colocado em uma bolsa de vácuo em uma estufa a temperatura de 90°C por cinco horas. Depois de sete dias (período de cura) ele foi retirado do molde e cortado nas dimensões de projeto, sendo ensaiado posteriormente.

O ensaio para determinar a deflexão máxima do trem de pouso foi realizado na Máquina Universal de Ensaios Emic-DL500, sendo capaz de capturar com grande precisão os resultados de forças e deslocamentos. Os dados deste ensaio foram utilizados para avaliar a eficiência dos modelos em elementos finitos utilizados na simulação do desempenho mecânico do trem de pouso.

## 3. RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados foram escolhidos com base na condição experimental (disposição e porcentagem de material por camada) que mostrou ser a mais adequada estruturalmente para a fabricação do trem de pouso; assim como na comparação dos resultados das simulações numéricas (elemento plano segundo análise em camadas e elemento de barra) para com os valores de força e deslocamento obtidos no ensaio de flexão em três pontos do trem de pouso.

### 3.1. CARACTERIZAÇÃO E SELEÇÃO DOS MATERIAIS

A tabela 2 apresenta as propriedades físico-mecânicas dos materiais ensaiados.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais ensaiados.

Condição Experimental	Tensão máxima (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Densidade (g/mm <sup>3</sup> )	D
C1	151,62	8,68	1,05	1,44
C2	408,17	35,28	1,26	3,25
C3	304,12	17,36	1,18	2,58
C4	476,21	34,87	1,21	3,94
C5	335,65	21,12	1,21	2,78
C6	335,4	22,32	1,16	2,9

Obs.: O índice de desempenho D está multiplicado por 10<sup>(-5)</sup>

A tabela 2 apresenta um comparativo entre os materiais investigados, lembrando que a escolha do mesmo é feita elegendo o de maior índice *D*. Constata-se, portanto, que a condição *C4* pode ser considerada a mais adequada, exibindo o valor de *D* de 3,94. Este comportamento pode ser atribuído pela elevada resistência a tração exibida pela fibra de carbono em comparação a fibra de aramida (Kevlar®). Por este motivo, a fibra de carbono foi usada nas posições mais afastadas da linha neutra, onde as tensões normais são maiores. As fibras de aramida foram adicionadas entre as camadas de fibras de carbono garantindo uma menor densidade do compósito final.

### 3.2. RESULTADOS DA ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS

Após a seleção do material que apresentou maior índice de desempenho, partiu-se para simulação do trem de pouso no modelo de elementos finitos.

Para a análise em camadas utilizou-se uma malha constituída por 9.008 elementos finitos, perfazendo um total de 18.893 nós, sendo necessários 15 segundos para o processamento. O valor de deslocamento obtido nesta simulação foi de 2,7556 mm, na direção do eixo *y*, medido nos nós 13.743 e 13.751. A figura 8 ilustra este resultado.

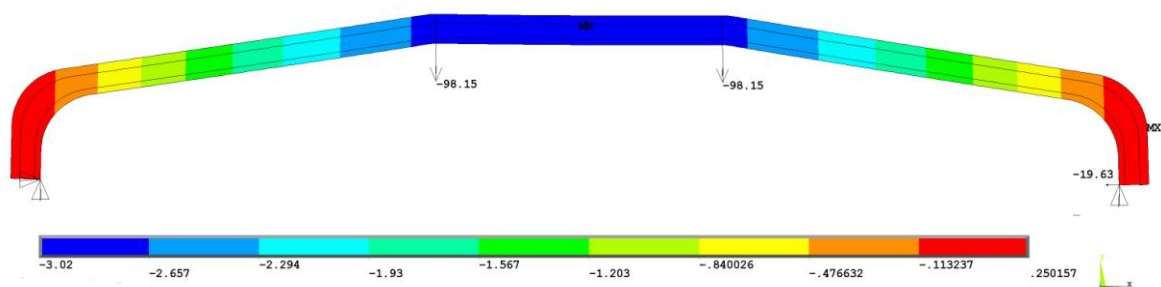


Figura 8 – Deslocamento na direção *y* do modelo bi-dimensional em camadas.

A análise numérica segundo o emprego do elemento de barra foi realizada com o emprego de 430 elementos finitos, sendo um milímetro a dimensão de cada elemento, totalizando 431 nós. O valor de deslocamento obtido nesta simulação foi de 2,7226 mm, na

direção do eixo y, medido nos nós 138 e 139, com um tempo de processamento de 1,83 segundos . A figura 9 ilustra este resultado.

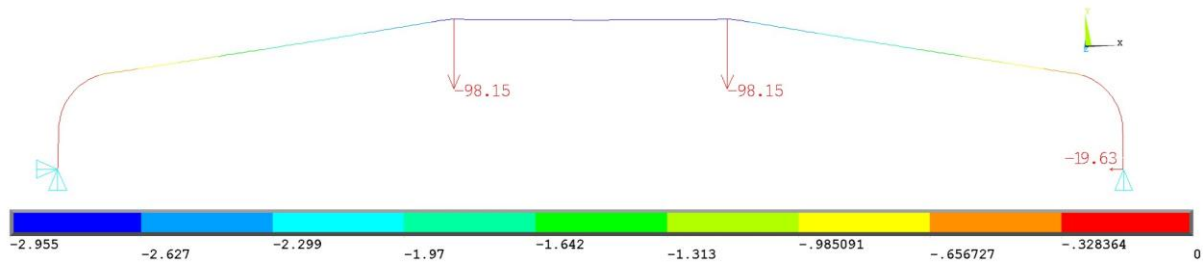


Figura 9 – Deslocamento na direção y do modelo barra.

### 3.3. RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO

A figura 10 exibe o gráfico que relaciona força e deslocamento obtidos durante o ensaio de flexão do trem de pouso.

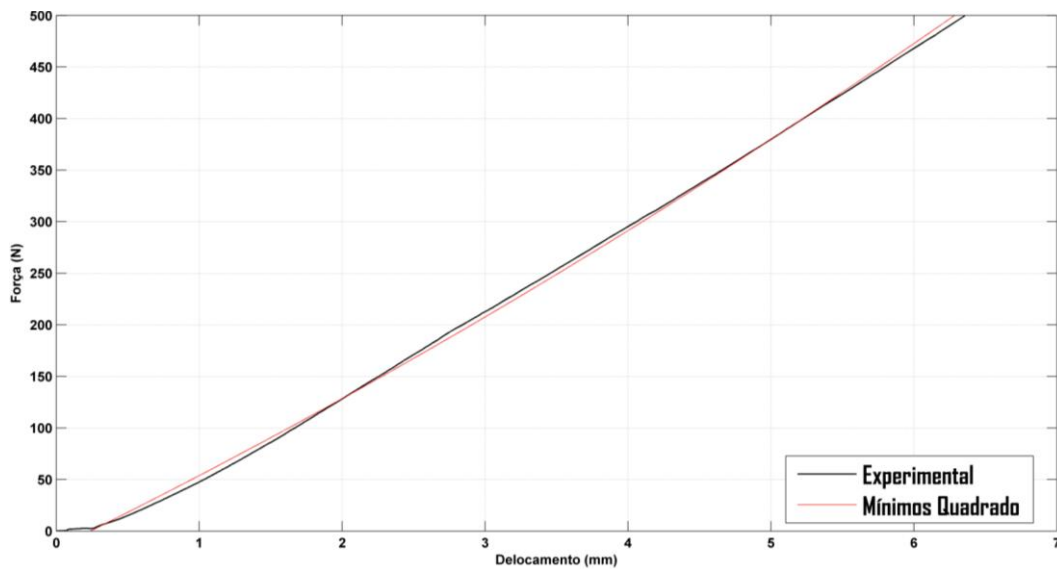


Figura 10 – Força *versus* deslocamento.

O gráfico da figura 10 indica que a curva da relação força *versus* deslocamento possui um comportamento bastante linear. Dessa forma, a equação da reta pode ser ajustada segundo os fundamentos do Método dos Mínimos Quadrado. Assim, o valor apresentado do deslocamento para uma força de intensidade 196,3 N é igual a 2,7924 mm. Esta força é a carga de dimensionamento definida no item 2.4.

## 4. DISCUSSÕES

A tabela 3 apresenta os valores dos deslocamentos obtidos da análise experimental e da análise em elementos finitos.

Tabela 3 – Comparação do deslocamento entre análise numérica e experimental.

Tipo de Modelo	Deslocamento em Y (mm)	Erro (%)	Número de Elementos
Experimental	2,7924	-	-
Camadas	2,7556	1,3178	9008
Barras	2,7226	2,4996	431

O resultado do deslocamento advindo da análise numérica em camadas apresentou um erro percentual relativo de 1,3178%, mostrando ser uma excelente estratégia numérica utilizada na simulação do trem de pouso.

Em relação à análise numérica com o emprego dos elementos de barra, o erro percentual encontrado é de 2,4996%, mostrando ser esta uma boa metodologia à ser empregada na análise do trem de pouso. A simplicidade envolvida neste modelo de cálculo certamente propiciará estudos futuros envolvendo a otimização do trem de pouso, quer seja da geometria, das proporções dos materiais ou de ambos em conjunto.

## 5. CONCLUSÕES

O material escolhido foi empregado com sucesso no trem de pouso da aeronave TKV 2009, tendo este componente reduzido 54,2% do peso em relação ao projeto de 2008, além de não apresentar deflexões que interferissem nas condições de decolagem e aterrissagem.

Ambos os modelos numéricos utilizados na simulação do trem de pouso apresentaram aproximações satisfatórias para com os resultados do ensaio experimental, porém, pela ordem de aproximação das simulações e pelo trabalho computacional envolvido, pode-se dizer que o modelo de barra é bastante promissor e eficaz no projeto do componente estrutural.

A figura 11 mostra o trem de pouso real com as respectivas distribuições das camadas, observa-se um perfeito alinhamento das fibras e um excelente acabamento final.



Figura 11 – Trem de Pouso.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Ansys Inc., Manual do software ANSYS® 12.1.
- Ashby, M. F., Evans, A. G., Gibson, J. W., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G., 2000, *“Metal Foams: a Design Guide”*, Ed. Butterworth-Heinemann.
- Barros, C. P., 2001, Uma Metodologia para o Desenvolvimento de Projeto de Aeronaves Leves e Subsônicas. Belo Horizonte; CEA-EEUFMG.
- Callister, W. D. Jr., 2007, *“Materials Science and Engineering: an Introduction”*, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 7a Ed.
- Daniel, I. M. ; Ishai, O., 1994, Engineering Mechanics of Composite Materials. New York: Oxford University Press.
- EN 2662, 1997. *Carbon Fibre Reinforced Plastics – Unidirectional Laminates – Flexural Test Parallel to the Fibre Direction*. British Standard Aerospace Series.
- Hibbeler, R. C., 2004, *“Resistência dos Materiais”*, Ed. Pearson Prentice Hall, 5a Ed.
- Raymer, D. P., 1992, *“Aircraft Design: a Conceptual Approach”*, Ed. Education Series, 2a Ed.
- Silva Junior, G. A., 2004, Simulação de Queda de Trem de Pouso com Flexibilidade Estrutural Utilizando Matlab. São José dos Campos; ITA-CTA.

## DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluso no trabalho.