



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

PROJETO DE UM TREM DE POUSO PARA AERONAVES RÁDIOCONTROLADAS

Plínio Ricardo dos Santos^{*1}, André Luís Cerávolo¹, Henrique Eustáquio Baêta¹, Vinícius Melo Pereira¹, Márcio Eduardo Silveira¹.

^{*1} Departamento de Engenharia Mecânica- Universidade Federal de São João del – Rei

Praça Frei Orlando 170, São João del Rei, Brasil
plinioricardosantos@hotmail.com

RESUMO

A função básica de um trem de pouso é absorver a energia cinética da aeronave durante o pouso e promover manobras em solo. Diferentes materiais podem ser usados, sendo os compósitos os principais destaques por apresentarem bons índices de desempenho. Apresenta-se neste trabalho, um projeto de trem de pouso do tipo triciclo, usando feixes de mola em material compósito para aeronaves rádiocontroladas, destinadas a competição SAE BRASIL AERODESIGN. A fibra de carbono unidirecional e a fibra de aramida bidirecional na matriz de resina epóxi foram combinadas de forma a proporcionar uma maior absorção de energia durante o pouso [1]. O trem de pouso foi projetado com a fixação da roda voltada para cima, assim obteve-se uma maior estabilidade em solo além de parte dos esforços atuarem em direções favoráveis às fibras. Duas placas de carbono bidirecional na matriz de resina epoxi foram posicionadas de forma a funcionar como feixes de molas, conseguindo-se assim, uma maior resistência próxima a região de fixação na fuselagem. Os cálculos de cargas foram realizados de acordo com a norma FAR Part 23 [2]. Definiu-se a geometria e a distribuição de camadas das laminas de carbono e aramida, e logo após, foi utilizado o método dos elementos finitos para análises numéricas estruturais no *software* Hyperworks®, de acordo com as cargas calculadas para as devidas condições de pouso. A partir dos resultados de tensão e deformação, partiu-se para a construção do trem de pouso, que foi testado realizando-se ensaios de queda livre da aeronave, e posteriormente, ensaios de voo. A partir dos resultados dos ensaios, foi possível comprovar a eficiência do modelo e sua aplicação em aeronaves rádiocontroladas.

Palavras Chaves: Trem de Pouso, Aeronaves Rádiocontroladas, Elementos Finitos.

REFERÊNCIAS

[1] Determinação das Dimensões Ótimas do Trem de Pouso Para uma Aeronave Rádiocontrolada, XI Congresso de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e Industrial, Porto Alegre, 2011.

[2] Federal Aviation Regulations. Part 23 - Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic and Commuter Category Airplanes. s.l. : Federal Aviation Administration, EUA, 1999.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. Introdução

Anualmente, acontece em São José dos Campos, Brasil, a competição SAE Brasil Aerodesign. A equipe “Trem Ki Voa” da Universidade Federal de São João del Rei, Brasil, vem sendo referência, por apresentar aeronaves com boas características impostas pelo regulamento e conseqüentemente boas classificações, estando entre as 10 melhores equipes nos últimos anos. Os principais objetivos são promover conhecimentos em engenharia aeronáutica e despertar o espírito de trabalho em equipe. A aeronave deve cumprir sua missão apresentando alta eficiência estrutural e deve transportar a maior quantidade possível de carga. Isso significa que as partes estruturais devem ser projetadas visando a redução de massa sem que a aeronave apresente falha em seus componentes durante a missão.

Entre os reforços usados em componentes estruturais laminados de auto desempenho, podemos citar as fibras de carbono e aramida (ou Kevlar). A fibra de carbono se destaca por ser o reforço de alto desempenho mais usada em compósitos avançados em matriz polimérica. Já a fibra de aramida é muito conhecida pela sua boa característica de absorção de energia. Esses materiais foram usados no projeto do trem de pouso apresentado neste trabalho.

2. Materiais e Métodos

Os processos do projeto e construção do trem de pouso foram realizados nos laboratórios da Universidade Federal de São João del Rei, Brasil. Todos os materiais compósitos usados foram adquiridos da empresa Alltec Materiais Compostos, por meio de um patrocínio. Os testes finais de voo da aeronave foram realizados nos aeroportos da região.

2.1 Configuração do trem de pouso

O trem de pouso é do tipo triciclo, tipicamente adotado por aeronaves cujo objetivo é transportar cargas. Essa configuração foi adotada por apresentar maior estabilidade em solo, decolagem satisfatória e pouso mais seguro que o convencional [3].

Buscando maior eficiência no amortecimento e melhor estabilidade em solo, o trem de pouso foi desenvolvido com curvatura para cima. As cargas transmitidas pelas rodas, devido ao pouso ou as manobras na pista, promovem um aumento do momento fletor ao longo das proximidades da fuselagem. Por isso, duas placas de carbono/epóxi que atuam livremente são usadas na fixação, que também tem o princípio de amortecimento por feixes de mola (Figura 1). A fixação do trem de pouso na fuselagem é feita através de uma placa de honeycomb com face de carbono.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

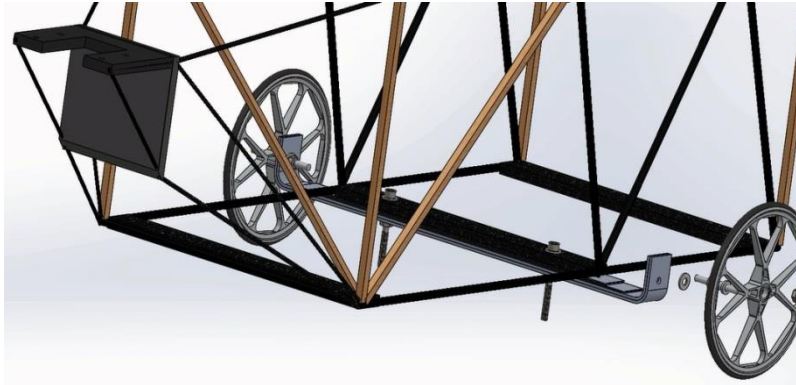


Figura 1: Configuração do trem de pouso

A parte principal é composta por metade em aramida, na busca de obter maior flexibilidade e absorção de energia (parte inferior) e metade em carbono unidirecional, melhorando a rigidez na parte superior. A Figura 2 mostra os detalhes.

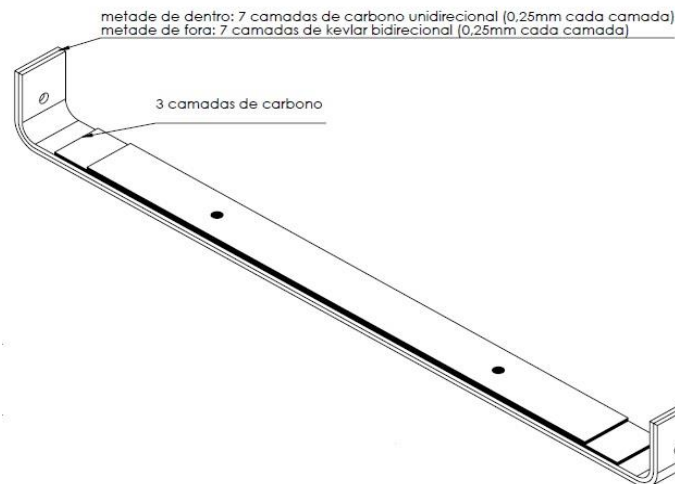


Figura 2: Distribuição de camadas

2.2 Caracterização da resina epóxi

A resina epóxi é um tipo de resina termofixa de auto desempenho muito usada como matriz polimérica. A matriz tem várias funções. Segundo [4], primeiramente ela liga as fibras umas às outras, fazendo assim com que as tensões aplicadas ao material seja distribuídas entre as fibras. Para isso, a matriz deve apresentar maior ductilidade e menor módulo do que a fibra, pois a maior



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

parte dos esforços deve ser suportada pelas fibras. A matriz também protege as fibras contra agentes químicos ou danos exteriores como abrasão mecânica, o que pode levar o material a falhas muito abaixo do normal. A matriz também tem a função de separar as fibras, fazendo com que as trincas frágeis que possam se propagar de uma fibra a outra, sejam barradas pela matriz.

Para o projeto e construção, foi utilizado resina epóxi ARALDITE LY 5052, e catalizador ARADUR 5052 CH na proporção de 67% Resina e 33% catalizador. Suas propriedades são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades da Resina Epóxi Utilizada [5]

Ensaio	Módulo de Elasticidade [Gpa]	Tensão Máxima [Mpa]	Dureza [HV]	Energia [J]
Flexão	1,67	71,22	-	-
Compressão	1,79	74,66	-	-
Tração	2,37	33,26	-	-
Charpy	-	-	-	14,7
UMD	3,02	-	13,79	-

2.3 Caracterização do compósito carbono/epóxi

Atualmente o carbono vem sendo usado em diversos projetos que necessitam de alto desempenho (indústria aeronáutica, automotiva, artigos esportivos, etc.), isto se deve as suas altas propriedades de resistência mecânica e rigidez, além do baixo peso e facilidade de se associar a outros materiais.

As fibras de carbono variam suas propriedades mecânicas e seus sistemas de produção dependendo da empresa fabricante. São produzidas através da poliácrlonitrila e dependendo do tipo de tratamento recebido pela fibra básica (carbonização, oxidação ou grafitização) é possível fabricar fibras com variadas configurações de resistência e de módulo de elasticidade. Podem ser encontradas em quatro principais tipos de qualidades: Alta Resistência (HS – High Strength) ou Módulo Comercial, Módulo Intermediário (IM – Intermediar Modulus), Alto Módulo (HM – High Modulus) e Módulo Superior (UHM – Ultra High Modulus) [6].

A fibra de carbono usada foi do tipo unidirecional correspondente ao módulo comercial. A Tabela 2 apresenta as propriedades para o compósito carbono /epóxi utilizado no projeto [7].



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabela 2: Propriedades do compósito carbono/epóxi

ρ (Kg/m ³)	E (GPa)	σ_t (Mpa)	G (Gpa)	Limite de Resistência ao Cisalhamento (Mpa)	Índice de desempenho σ_t/ρ (MPa.m ³ /kg)
1260	220	600	35,28	408,17	0,476

2.4 Caracterização do compósito aramida/epóxi

As fibras de aramidas são derivadas do nylon e são muito conhecidas pelo nome de Kevlar®, uma marca registrada da empresa americana Dupont. Essas fibras são muito conhecidas por sua habilidade em resistir a choques cíclicos (impedindo a propagação de trincas) e ter alta resistência específica (resistência/densidade). Porém quando se trata de compressão a aramida possui propriedades inferiores a outros tipos fibras. Segundo [6], existem duas formas principais de fibras de aramidas: Kevlar®29 e Kevlar®49. O Kevlar®29 é usado principalmente na produção de cabos e coletes a prova de bala. Já o Kevlar®49 é usado como reforço em compósitos, sendo muito utilizado nas indústrias aeroespaciais e automobilísticas. As propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 3 [1].

Tabela 3: Propriedades da aramida (Kevlar) 0°-90°

Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Densidade (Kg/m ³)
151,62	8,68	1049,82

2.5 Caracterização do honeycomb com face de carbono

Estruturas do tipo sanduiche proporcionam materiais com baixo peso, alta resistência à compressão e a flexão. Segundo [4], os materiais sanduiches podem ser considerados como classe de compósitos estruturais, consistindo em duas laminas externas, ou faces, que estão separadas e unidas por adesivo a um núcleo mais espesso. As laminas externas são feitas de um material relativamente rígido e resistente, devem ser espessas o suficiente para resistir às tensões de tração e compressão resultantes a aplicação de uma carga. O núcleo deve ser de um material leve com um baixo módulo de elasticidade, além de proporcionar um suporte continuo das faces e apresentar resistência ao cisalhamento. Um tipo de núcleo é a colmeia, finas folhas moldadas com o formato de células hexagonais interligadas, com os eixos orientados perpendicularmente aos planos da face.

Nesse projeto as laminas externas são de carbono 0°-90°, o adesivo é a resina epóxi, o núcleo é de aramida (colmeia) com a espessura média de 6,7 mm. Foram realizados ensaios de flexão nas estruturas sanduiches segundo a norma ASTM [8] obtendo os resultados da Tabela 4.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabela 4: Propriedade do honeycomb para ensaio de flexão em três pontos

Máxima força (N)	Tensão de cisalhamento (Mpa)	Tensão Normal (Mpa)
350,88	1846,97	54,41

As Figuras 3a e 3b mostram uma das placas utilizadas para a confecção dos corpos de prova para os ensaios (cujas faces foram laminadas no laboratório da universidade) e o ensaio de flexão em três pontos.



a)



b)

Figura 3: a) Honeycomb com face de fibra de carbono e b) Ensaio em três pontos

2.6 Cálculo de Cargas

Segundo [9] existem dois grupos de cargas em solo. O primeiro ocorre durante a aterragem da aeronave, ou seja, da transição de uma condição na qual o peso do avião é apoiado pela sustentação à condição de ser apoiado pelo solo. O segundo resultam da operação da aeronave na pista, ou seja, durante o seu taxiamento, ou uso do freio na execução de curvas, entre outras operações em solo.

Os cálculos de cargas foram realizados segundo a norma FAR Part 23 [2,9], no software Excel®. A Tabela 5 apresenta os resultados para as várias condições de pouso previstas por norma.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabela 5: Descrição e reações nos diversos tipos de aterragem

Descrição	Norma	Cargas	Trem principal		Trem auxiliar
			Roda direita	Roda esquerda	Roda de nariz
Pouso em três rodas	FAR 23.479(a) (2) (i)	Vertical	242,36 N	242,36 N	71,52 N
		Horizontal	60,59 N	60,59 N	17,88 N
Pouso em duas rodas	FAR 23.479(a) (2) (ii)	Vertical	278,12 N	278,12 N	–
		Horizontal	69,53 N	69,53 N	–
Pouso em uma roda	FAR 23.483	Vertical	278,12 N	–	–
		Horizontal	69,53 N	–	–
Cargas laterais	FAR 23.485 (c)	Vertical	100,79 N	100,79 N	–
		<i>Inboard</i>	75,78 N	–	–
		<i>Onboard</i>	–	50,02 N	–
Condições suplementares	FAR 23.499 (b)	Vertical	–	–	25,46 N
		Horizontal	–	–	10,19 N

2.7 Simulação numérica

O pouso em uma roda é um dos mais críticos dentre as possibilidades de aterrissagem, pois estes geram cargas fletoras e cisalhantes. Empregaram-se ferramentas numéricas para previsão dos esforços obtidos no trem de pouso. Para tal análise, foram utilizados os softwares hypermesh como pré-processador, radioss como processador e hyperview como pós-processador.

Como condições de contorno, foram utilizadas as cargas obtidas da Tabela 5. Aplicou-se um fator de segurança de 1,2, ao qual se mostrou adequado diante dos testes. A Figura 4 apresenta as condições de contorno aplicadas no modelamento.

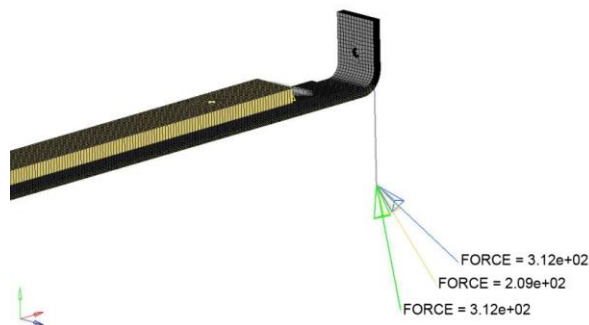


Figura 4: Modelamento do trem de pouso na simulação (cargas em N)



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

As tensões foram encontradas segundo o critério de falha de máxima tensão, que são apresentadas na seção 3.

2.8 Fabricação do trem de pouso

Para a fabricação do trem de pouso, foi utilizada a técnica de laminação *vacuum bag*, que consiste em submeter o compósito a vácuo logo depois de ser impregnado com resina e catalisador. O laminado é coberto com um plástico para vácuo, que é vedado e conectado a uma bomba que produz o vácuo. O molde foi fabricado em madeira, que passou por um processo de polimento e em seguida recebeu uma camada de verniz e novamente um processo de polimento. A Figura 5 mostra a aplicação do vácuo na fabricação das placas.



Figura 5: Aplicação do vácuo na fabricação das placas

2.9 Ensaios

A fim de analisar a capacidade do trem de pouso de suportar as cargas, foram realizados ensaios de queda livre com o máximo peso de decolagem da aeronave em nível do mar. O ensaio consiste em elevar a aeronave a uma altura que produz a velocidade de descida e em seguida solta-la em queda livre. O ensaio foi realizado para as condições de pouso nivelado, em duas e uma roda (Figura 6).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

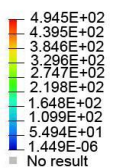


Figura 6: Ensaio de queda livre

3. Resultados

Através das análises de tensões e deformações, foi possível viabilizar a geometria final para a construção e posteriormente os testes. As tensões se mostraram abaixo das tensões admissíveis, obtidas através das caracterizações dos materiais. A Figura 7 mostra o resultado das tensões normais encontradas (MPa).

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D) (P1 (major), Max)



Max = 4.945E+02
Min = 1.449E-06

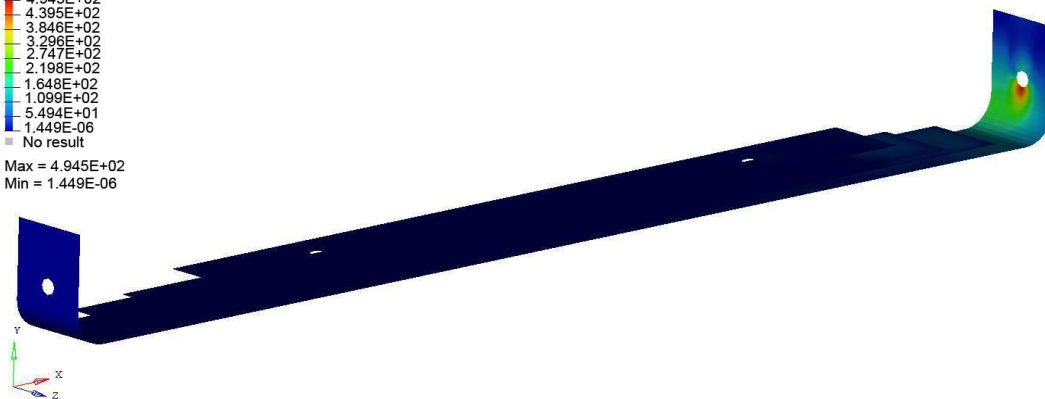


Figura 7: Tensões para o pouso em uma roda



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Os resultados de queda livre mostraram a boa atuação do trem de pouso, que foi capaz absorver os impactos. Sem danos ao trem de pouso, partiu-se para os testes de voo, que foram realizados com cargas gradativas. Em todos os pousos realizados, novamente houve atuação satisfatórias do trem de pouso, exceto em uma queda da aeronave, que ocorreu por outras ocasiões fazendo com que o trem de pouso rompesse no centro.

4. Conclusões

As cargas calculadas aplicadas na simulação numérica possibilitaram uma pré-análise dos possíveis comportamentos do trem de pouso, o que viabilizou a construção para testes. Os ensaios de queda livre permitiram obter pré-análises das possíveis situações de pouso. Com esses resultados, foi possível realizar os voos de teste do protótipo (Figura 8), que por fim, definiu que este pode ser utilizado em um veículo aéreo não tripulado.

Para trabalhos futuros, estuda-se o uso de acelerômetros e extensômetros nos ensaios estáticos e de queda livre, podendo validar com uma maior precisão as cargas e as deformações no trem de pouso.



Figura 8: aeronave em voo

5. Referências

- [1] Determinação das Dimensões Ótimas do Trem de Pouso Para uma Aeronave Rádiocontrolada, XI Congresso de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e Industrial, Porto Alegre, 2011.
- [2] Federal Aviation Regulations. Part 23 - Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic and Commuter Category Airplanes. s.l. : Federal Aviation Administration, EUA, 1999.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- [3] BARROS, C. P. Uma Metodologia para o Desenvolvimento de Projeto de Aeronaves Leves e Subsônicas. [ed.] DEMEC – UFMG. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. abril de 2001.
- [4] CALLISTER, W. D. (s.d.). Ciência e Engenharia de Materiais uma introdução.
- [5] SILVA, N.S., et al. Estudo Comparativo em Longarinas do Tipo Caixa em Madeira Freijo e Cilindrico-Cônica de Carbono para uma Aeronave Radiocontrolada. XII CONEMI & II COEN/UFSJ. 02 a 05 de Outubro de 2012, p. 16.
- [6] NASSEH, J. Barcos: Métodos Avançados de Construção em Composites. Rio de Janeiro, 363 p. 2007.
- [7] Santos, P. R.; et al; Projeto e Construção de uma Longarina Tubular em Fibras de Carbono para Aeronaves Rádiocontroladas; Universidade Federal de São João del Rei.
- [8] C393/C393M – 11 - Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure.
- [9] ISCOLD, P. H. A. O. Introdução às Cargas nas Aeronaves. Belo Horizonte : s.n., 2002.