

## **DIMENSIONAMENTO DAS LONGARINAS PRINCIPAL E SECUNDÁRIA PARA UM AEROMODELO CLASSE MICRO DA COMPETIÇÃO SAE BRASIL DE AERODESIGN 2017**

Adriano José de Farias Leandro (1); José Victor Antunes Pamplona (2); Enzo Ravanelli Dille Porto (3); Orientador: Prof. Dr. Francisco José Simões (4)

1 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), [adrianoflleandro@gmail.com](mailto:adrianoflleandro@gmail.com)

2 UFCG, [pamplonavictor@gmail.com](mailto:pamplonavictor@gmail.com)

3 UFCG, [enzo.porto@outlook.com](mailto:enzo.porto@outlook.com)

4 UFCG, [francisco.simoes@ufcg.edu.br](mailto:francisco.simoes@ufcg.edu.br)

**Resumo:** A competição estudantil Aerodesign Brasil, organizada pela Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade (SAE), ocorre todos os anos juntando universidades de todo o país em uma competição, visando fomentar o conhecimento sobre engenharia aeronáutica. Não houve uma restrição dimensional no ano de 2017, no que se diz respeito à asa, sendo assim a equipe desenvolveu uma estrutura que fosse de fácil desmontagem, sendo esse um requisito importante para a pontuação durante a competição. A longarina é responsável por suportar as reações aerodinâmicas em voo. Inicialmente deve-se determinar a configuração da asa, para que assim possamos prosseguir com o dimensionamento, sendo assim pode-se obter conceitualmente dimensões máximas, estimativas de peso, geometria e posição da longarina. Foi considerado o modelo físico de viga engastada, onde através de cálculos pode-se determinar a tensão de flexão, tensão de cisalhamento, tensão de torção e deflexão máximas, e assim definir dimensão e geometria que aliadas ao material escolhido (fibra de carbono) são capazes de suportar tais valores sem falhar. Os resultados foram obtidos a partir de cálculos analíticos provenientes de conceitos do campo da resistência dos materiais e ensaio estático, de forma que foi utilizado uma longarina de tubo de fibra de carbono que viria a suportar todos os esforços presentes na asa.

**Palavras-chave:** Dimensionamento, Longarina tubular, Asa, SAE.

### **INTRODUÇÃO**

A Competição SAE AeroDesign ocorre nos Estados Unidos desde 1986, tendo sido concebida e realizada pela SAE International, sociedade que deu origem à SAE BRASIL em 1991 e da qual esta última é afiliada. A partir de 1999 esta competição passou a constar também no calendário de eventos estudantis da SAE BRASIL. A Competição AeroDesign consiste de uma competição de engenharia, aberta a estudantes universitários de graduação e pós-graduação em Engenharias ligadas à mobilidade. É organizado pela SAE BRASIL (Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade) cumprindo uma de suas missões, a de contribuir para a formação acadêmica dos futuros profissionais da mobilidade. (SAE - Society of Automotive Engineers, 2017).

Trata-se de uma competição com o objetivo de promover uma oportunidade aos estudantes, ordenados em equipe, desenvolver em todas as etapas um projeto aeronáutico, desde a concepção e detalhamento do projeto, até mesmo a construção e testes, para finalmente competir com outros projetos semelhantes. Para a 19<sup>o</sup> Competição as equipes tinham como objetivo conceber, projetar, documentar, construir e voar um avião radio controlado que esteja

(83) 3322.3222

[contato@conapesc.com.br](mailto:contato@conapesc.com.br)

[www.conapesc.com.br](http://www.conapesc.com.br)

de acordo com os aspectos da missão e que fosse o mais otimizado possível em relação ao regulamento de 2017 (SAE BRASIL, 2017).

A Competição SAE BRASIL AeroDesign ocorre todos os anos na cidade de São José dos Campos e é composta por três categorias diferentes, elas são: Regular, Advanced e Micro, com requisitos e restrições específicas à cada uma dessas classes. Para a classe regular a aeronave deve utilizar motor a combustão, dentre os expostos no regulamento, e carregar a maior carga possível dentro das restrições dimensionais impostas pelo regulamento. A classe micro utiliza de motores elétricos e são geralmente menores que as aeronaves da classe regular, as aeronaves dessa classe devem ser desmontadas no menor tempo possível e acondicionada em uma caixa com dimensões geométricas restritas. Já na classe Advanced não tem restrições quanto a motor, porém a limitação quanto a área da hélice, podendo ser utilizado motores elétricos ou a combustão com o objetivo da aeronave atingir maior velocidade possível.

Dentre diversas equipes de todo o Brasil que participam da Competição SAE Aerodesign, a Equipe Parahybas Aerodesign é a única participante da cidade de Campina Grande e nas últimas competições foi a equipe que representou o estado da Paraíba. Competindo na classe regular desde o ano de 2008 a equipe vem apresentando uma melhora crescente na pontuação a cada ano. Desde o ano 2015 a equipe Parahybas segue participando da classe micro. No ano de 2017, foi realizada a 19ª Competição SAE Aerodesign, onde mais uma vez a equipe Parahybas marcou presença tanto na categoria micro quanto na regular.

## **OBJETIVOS**

O presente artigo tem como objetivo realizar o dimensionamento da longarina da asa utilizada na aeronave alocada na categoria micro a partir das restrições impostas pelo regulamento SAE Brasil de Aerodesign do ano de 2017, por meio de cálculos analíticos e ensaios estruturais.

## **METODOLOGIA**

Para a realização do trabalho proposto levou-se em consideração o regulamento vigente da Competição SAE de Aerodesign Brasil do ano de 2017 para a classe micro. Onde a partir da adequação ao mesmo foi possível obter todas as restrições necessárias para o dimensionamento da asa. Para os cálculos analíticos foram utilizados conceitos de Resistência dos Materiais. Também foram executados ensaios estáticos para a verificação dos resultados analíticos.

## REFERENCIAL TEORICO

Para o ano de 2017, a classe micro não teve restrição de motores, sendo necessário apenas a utilização de motores elétricos para o projeto da aeronave. Porém na carga paga (carga a qual a aeronave deveria carregar) houve três opções, que foram: carga paga alijável, carga paga-não alijável e carga paga Lapes.

A carga paga não alijável trata-se de uma carga que será transportada no avião durante todo o voo e retirada do avião em um tempo máximo de 5 minutos após o pouso. A carga paga alijável é uma carga que será transportada no avião e ejetada durante o voo por meio da gravidade. Já a carga Lapes tem as mesmas características da carga alijável, a diferença é que a carga deverá ser extraída por meio de um paraquedas extrator durante o voo.

Outra restrição existente no regulamento é a da caixa de transporte e desmontagem, tal restrição determina que a aeronave deve ser projetada e construída de maneira que, quando desmontada caiba em uma caixa, juntamente com o rádio transmissor, receptor, carga paga, baterias e as ferramentas necessárias para desmontagem da aeronave. A desmontagem da aeronave deve ser realizada por duas pessoas o mais rápido possível, com o limite de tempo de 3 minutos.

A caixa de transporte deveria possuir um volume interno máximo de  $0,100 \text{ m}^3$  e ter um formato de paralelepípedo no qual os lados deveriam ser ortogonais entre si e as medidas de comprimento, largura e altura deveriam ser correspondentes as dimensões internas da caixa. (SAE BRASIL, 2017).

Todas essas restrições foram levadas em conta pela equipe Parahyasas para o projeto conceitual da aeronave Milagre, na qual a partir das pontuações de voo e pontuação de tempo de desmontagem, foi possível determinar alguns parâmetros do projeto, visando uma maior pontuação. As equações que regem a pontuação da competição SAE Aerodesign 2017 estão exemplificadas abaixo:

Onde:

$$P_{voo} = 3300 \times FPV \times FTD \times (0,15 - VTC)^{1,5} \times \ln(3 \times CP_{LAPES} + 2 \times CP_{AL} + CP_{NAL} + 0,5) \quad (1)$$

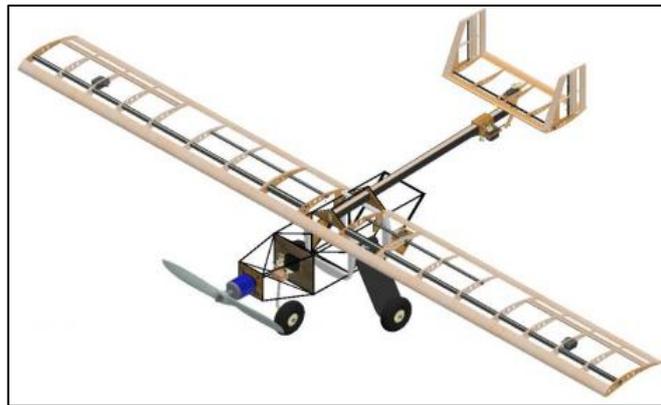
$$FTD = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{t}{50} - 6\right)} \quad (2)$$

$$FPV = 1,10 - 15X \left( \frac{PV_{PREVISTO} - PV_{REAL}}{PV_{PREVISTO}} \right)^2 \quad (3)$$

Onde:

Pvoo=Pontuação de voo; VTC =Volume da caixa de transporte (m<sup>3</sup>); FTD = Fator de tempo de desmontagem; t = Tempo de desmontagem (s); FPV = Fator de previsão de peso vazio; CPAL = Carga paga alijada no voo (Kg); CPNAL =Carga paga não alijada no voo (Kg); CPLAPES = Carga paga Lapes extraída no voo (Kg); PV = Peso vazio;

Devido à relação entre as pontuações indicadas acima, optou-se em desenvolver um projeto conceitual da aeronave onde utilizaríamos a carga Lapes, devido a maior contribuição na pontuação, bem como foi utilizado o menor volume de caixa possível para a configuração escolhida da aeronave, visando assim maximizar a pontuação. A partir do projeto conceitual foi definida a configuração da aeronave.



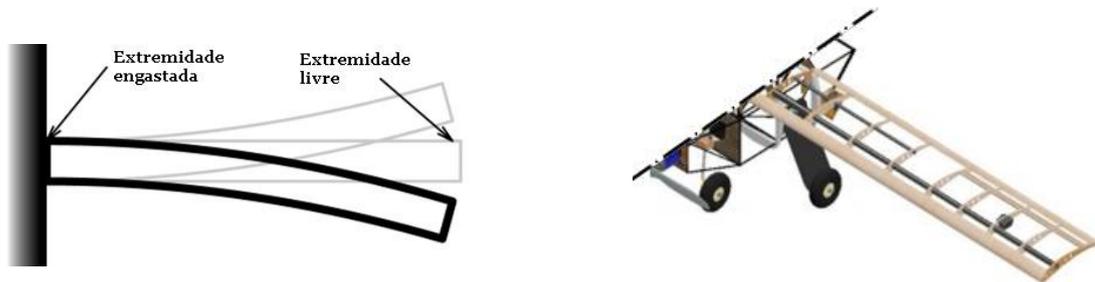
**Figura 1- Concepção final da Aeronave Milagre**  
**Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**

Existem diversas configurações de asas, as quais são escolhidas de acordo com o projeto, visando as características de voo desejadas. A asa é o principal elemento responsável por manter a aeronave em voo, pois é nela que se desenvolve uma força de sustentação da aeronave.

A partir de estudos aerodinâmicos e da estabilidade e controle da aeronave, adotou-se a geometria retangular da asa. Para facilitar na desmontagem e acondicionamento da aeronave na caixa optou-se por fazer uma asa tripartida. A asa tem envergadura (comprimento) de 1,5m e corda de 0,150m. Foram utilizados para a construção da asa: tubos de fibra de carbono, madeira balsa e compensado aeronáutico.

Durante o voo a asa sofre a ação de forças aerodinâmicas, gerando diversos esforços que podem vir a prejudicar a estrutura da asa e assim ocasionar a queda da aeronave. Por isso é necessário um dimensionamento adequado para que a

estrutura suporte todos os esforços. Inicialmente para o dimensionamento da asa, modelou-se a longarina como uma viga engastada, que pode ser vista a seguir.



**Figura 2- Comparação entre modelo físico e modelo 3d.**  
**Fonte: E-CIVIL, 2018.**  
**EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**

É sabido que para a viga em questão, sob a ação das forças aerodinâmicas citadas anteriormente, há a ação de esforços cortantes, momentos fletores e momentos de torção. Esforço cortante é uma força de cisalhamento que encontra-se no plano da área e é desenvolvida quando as cargas externas tendem a provocar o deslizamento de um dos seguimentos do corpo sobre o outro, o momento fletor é causado pelas cargas externas que tendem a fletir o corpo em torno de um eixo e que se encontra no plano da área, o momento de torção é o efeito desenvolvido quando as cargas externas tendem a torcer um seguimento do corpo com relação ao outro (HIBBELER, 2010).

Esses esforços tendem a gerar tensões de flexão, cisalhamento e torção na longarina da asa. Assim para prosseguimento do dimensionamento se fez necessário a obtenção de dados provenientes da equipe responsável pela área de cargas nas superfícies alares. A partir dos dados obtidos, foi possível determinar as tensões e deformações ao longo do comprimento da longarina, e assim definir suas dimensões de modo que não houvessem falhas. Os Esforços máximos obtidos podem ser observados na tabela a seguir:

<b>ESFORÇOS</b>	<b>VALORES</b>
<b>Momento Torsor Máximo da longarina principal (T)</b>	1,878 Nm
<b>Momento Fletor Máximo da longarina principal (M)</b>	5,568 Nm
<b>Esforço Cortante Máximo da longarina principal (V)</b>	35,306 N
<b>Momento Fletor Máximo da longarina secundária (M)</b>	2,049 Nm
<b>Esforço Cortante Máximo da longarina secundária (V)</b>	12,521869 Nm

**Tabela 1- Esforços atuantes na asa.**  
**Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**

Optou-se por utilizar tubos de fibra de carbono como longarina da asa, devido a facilidade para realizar a desmontagem da asa e a disponibilidade de mercado. Utilizou-se dois tubos para a longarina principal (Tubos 1 e 2) e um para a longarina secundária (tubo 3). Para a utilização do tubo de fibra de carbono levou-se em conta as seguintes propriedades do material que podem ser vistas na tabela a seguir:

PROPRIEDADES	VALORES
Modulo de elasticidade (E)	48,9 GPa
Tensão de Flexão admissível ( $\sigma_{flexão adm}$ )	661 MPa
Tensão de cisalhamento admissível ( $\tau_{adm}$ )	7,1 Gpa

Tabela 2- Propriedades do tubo de fibra de carbono.

Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.

### Tensão de Flexão

“A flexão consiste no desvio do eixo de uma barra reta ou na variação de curvatura de uma barra curva (...), nas barras retas os deslocamentos dos pontos dirigidos perpendicularmente à posição inicial do eixo se denominam flecha” (JUNIOR, 2008, p.30). A ação da deflexão é decorrente de cargas transversais ao eixo e momentos fletores, pode-se exemplificar tal fenômeno observando um esquema de uma viga sob flexão, como mostrado na figura abaixo:

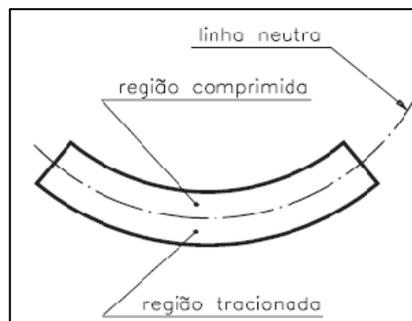


Figura 3- Viga sob o esforço de flexão

Fonte: EBAH, 2018.

Quando a longarina está sob flexão, surgem tensões de tração e compressão que crescem a partir da linha neutra, que para um material simétrico encontra-se no meio da seção transversal, e crescem até atingir um máximo que se encontra na extremidade da seção transversal. Logo pode-se encontrar as tensões máximas de flexão a partir da seguinte equação:

$$\sigma_{Flexão} = \frac{M \times y}{I} \quad (4)$$

$$I = \pi * \frac{(De^4 - Di^4)}{64} \quad (5)$$

Onde y é a distância da linha neutra até a superfície mais externa do tubo, M é o momento Fletor

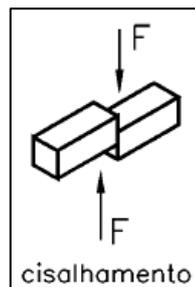
máximo que pode ser visto na tabela 1 e  $I$  é o momento de inércia do tubo que pode ser obtido a partir da equação 5, no qual  $D_e$  e  $D_i$  tratam-se respectivamente dos diâmetros externo e interno dos tubos. Logo utilizou-se como  $y$  o raio maior dos tubos e o momento de inércia mostrado na tabela 4, assim obteve-se as tensões máximas de tração e compressão provenientes do momento fletor.

### Tensão de cisalhamento

“O cisalhamento surge quando as forças exteriores tendem a deslocar as seções planas paralelas da barra uma em relação a outra sendo a distancia entre elas constantes” (JUNIOR, 2008, p.29). O cisalhamento máximo pode ser calculado a partir do esforço cortante obtido na tabela 1 e com a área dos tubos, utilizando a seguinte equação:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (6)$$

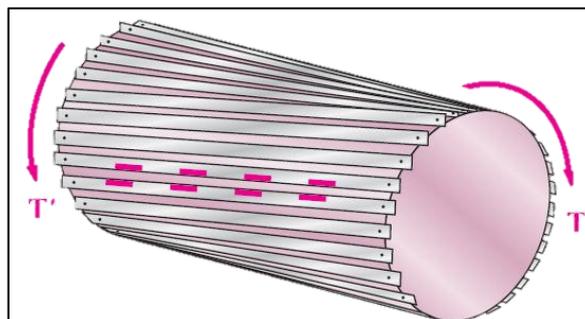
Onde pode-se observar a representação do fenômeno descrito na figura abaixo:



**Figura 4- Representação da Tensão de Cisalhamento**  
**Fonte: MECATRÔNICA POR FRANCESCO, 2018.**

### Tensão de torção

Segundo Junior (2008, p.30), “a torção surge quando, sobre uma barra, atuam forças exteriores que formam um momento com respeito ao seu eixo. A deformação de torção vem acompanhada de um giro das seções transversais da barra, umas em relação as outras, ao redor do seu eixo”. Pode-se observar uma representação da tensão de torção e a fórmula para calcular a mesma a seguir:



**Figura 5- Representação da Tensão de Torção**  
**Fonte: EBAH, 2018.**

$$T = \frac{\pi}{16} \times \tau \times \frac{D_e^4 - D_i^4}{D_e} \quad (7)$$

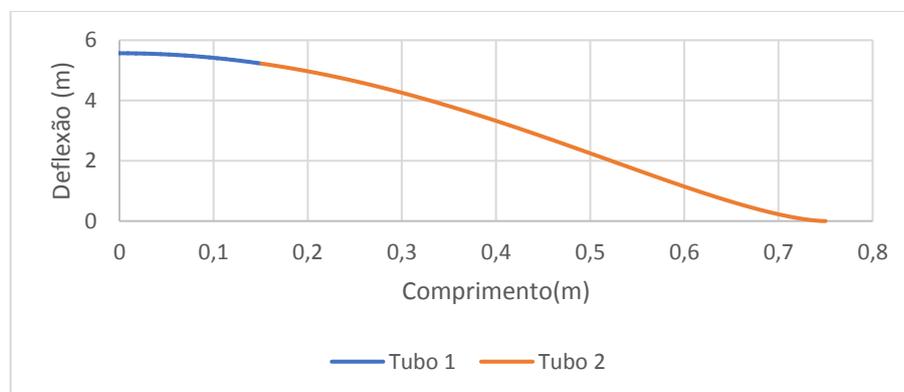
Onde, isolando o termo de cisalhamento ( $\tau$ ) da equação 7 e utilizando os dados das tabelas 1 e 2 para os tubos 1 e 2, encontra-se as tensões de cisalhamento máximas provenientes do momento Torsor (T).

### Cálculo da deflexão

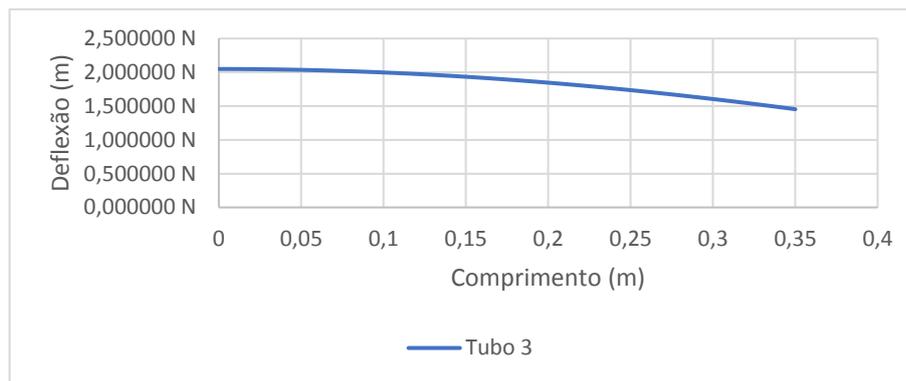
Mediante a ação das forças aerodinâmicas e como a asa esta modelada como uma viga engastada conforme mostrado na figura 3, a longarina da asa tender-se-á a defletir, ou seja, as forças farão com que a barra “encurve”. Para manter a segurança da estrutura, foi considerada como aceitável uma deflexão máxima de 8 cm, conforme adotada pela equipe, logo para calcular a deflexão máxima da longarina utilizou-se a equação de afundamento que pode ser descrita como:

$$\int \int \frac{M(x)}{EI} dx dx \quad (8)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do tubo de fibra de carbono, que se encontra no quadro 2 e M(x) trata-se da função momento fletor que foi obtida segundo a distribuição do momento fletor ao longo da longarina, que foi obtida pelos dados provenientes da equipe de cargas e aeroelasticidade, e assim foi possível plotar o gráfico do momento fletor ao longo do comprimento da longarina e obter a função a função do gráfico (M(x)) a partir do software Microsoft Excel.



**Gráfico 1- Distribuição do Momento Fletor ao longo do comprimento da longarina principal**  
**Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**



**Gráfico 2- Distribuição do Momento Fletor ao longo do comprimento da longarina secundária**  
**Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das equações apresentadas e dos dados apresentados pelas tabelas anteriormente, foi possível fazer os cálculos das tensões máximas, bem como da deflexão que as longarinas iriam sofrer, logo com a utilização do software Microsoft Excel foi possível obter os seguintes dados:

<b>Grandezas</b>	<b>Valores Máximos</b>
<b>Tensão de Flexão Máxima-Longarina principal</b>	90,12179418 MPa
<b>Tensão de Cisalhamento Máxima (proveniente do esforço cortante) - Longarina principal</b>	9,147267193 MPa
<b>Tensão de Cisalhamento Máxima (proveniente da Torção) – Longarina principal</b>	12,21531033 MPa
<b>Deflexão máxima-Longarina principal</b>	3,707 cm
<b>Tensão de Flexão Máxima-Longarina secundária</b>	120,4218439 MPa
<b>Tensão de Cisalhamento Máxima (proveniente do esforço cortante) - Longarina secundária</b>	0,797166956 MPa
<b>Deflexão máxima-Longarina secundária</b>	3,27 mm

**Tabela 3-Resultados das tensões calculadas**  
**Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**

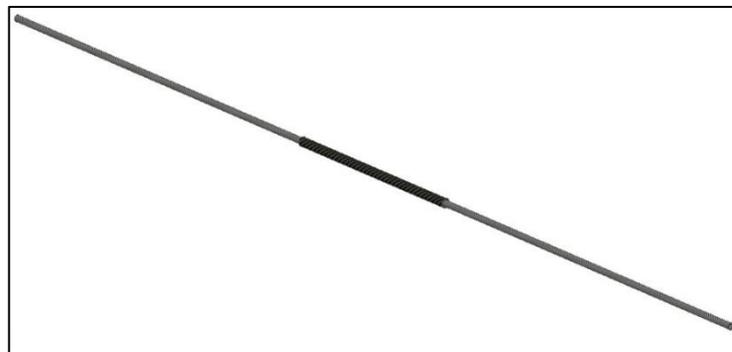
De posse das intensidades das tensões máximas que agem na asa bem como da deflexão, conforme mostrado na tabela 3, e a partir das propriedades do tubo de fibra de carbono mostrado na tabela 2, pode-se comparar as tensões máximas com

as tensões admissíveis do material e assim obter as dimensões adequadas para longarina suportar todos os esforços, visando manter o baixo custo e peso do material aliado com uma ótima eficiência. Logo, decidiu-se utilizar três tubos de fibra de carbono: dois tubos para a longarina principal que suportassem principalmente os esforços de flexão e um tubo para a longarina secundária afim de aliviar os esforços de torção presentes na longarina principal. Pode-se observar as dimensões ideais calculadas para cada tubo na tabela abaixo:

COMPONENTES	DIMENSÃO	MOMENTO DE INERCIA
Tubo de fibra de carbono para longarina principal (tubo 1)	14X12X300 mm	8,67865E-10 m <sup>4</sup>
Tubo de fibra de carbono para longarina principal (tubo 2)	10X8X650 mm	2,89812E-10 m <sup>4</sup>
Tubo de fibra de carbono para longarina secundária (tubo 3)	6X4X365 mm	5,10509E-11 m <sup>4</sup>

**Tabela 4- Dimensões do tubo de fibra de carbono na longarina da asa.**  
**Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**

Pode-se observar a concepção final da longarina principal abaixo, onde uniu-se os tubos com a utilização de uma anel de nylon, sendo na montagem o tubo 1 como tubo central e dois tubos 2 conectados na sua extremidade.



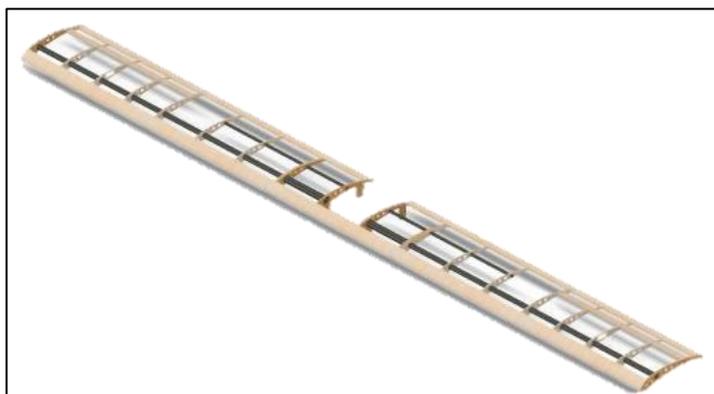
**Figura 6- Concepção final da Longarina principal**  
**Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**

Foi feito também um ensaio estático para comparar com a deflexão calculada. O ensaio realizado busca uma aproximação do fenômeno real, visto que as forças atuam na longarina seguindo uma distribuição uniforme, o ensaio consistiu em concentrar as cargas nas posições de cada perfil e analisar a deflexão sofrida pela longarina. Após o ensaio, verificou-se que a longarina sofreu a deflexão de aproximadamente 3,3 centímetros, o que se aproximou da deflexão calculada. Pode se observar o ensaio na figura abaixo:



**Figura 7- Ensaio estático da longarina principal**  
**Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**

Utilizou-se perfis de madeira balsa e compensado aeronáutico para garantir a forma aerodinâmica da asa, dando assim seu formato final. Pode-se observar a asa pronta na figura abaixo:



**Figura 8- Concepção final da asa**  
**Fonte: EQUIPE PARAHYASAS, 2017.**

## **CONCLUSÕES**

Com a análise feita a partir dos dados obtidos, foi possível dimensionar uma longarina principal e outra secundária para a asa da aeronave de modo que esta fosse capaz de suportar sem falhar, os esforços que atuaram sobre ela. Sendo a metodologia utilizada empregada por vários anos no projeto e esta possuindo uma grande confiabilidade. Além do ensaio estático ter chegado muito próximo dos cálculos, garantindo assim uma confiança a mais no projeto da asa.

A asa foi construída e a aeronave Milagres voou satisfatoriamente, assim podemos concluir que o objetivo proposto foi alcançado de maneira eficaz.

## REFERÊNCIAS

BEER, Ferdinand P et. Al. **Resistência dos Materiais**. 5. Ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2011.

EBAH. **Relatório de resistência dos materiais - ensaio de flexão**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABXTwAJ/relatorio-resistencia-dos-materiais-ensaio-flexao>>. Acesso em: 20 maio 2018.

ECIVIL. **Viga em balanço**. Disponível em: <<http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-viga-em-balanco.html>>. Acesso em: 19 maio 2018.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

JUNIOR, Jonatas Araújo de Lacerda. **Apontamentos de aula do Engº Mecânico**: Jonatas Araújo de Lacerda Junior. Campina Grande, 2008. (Apostila).

MECATRÔNICA POR FRANCESCO. **OS PRINCIPAIS ESFORÇOS MECÂNICOS**. Disponível em: <<http://meatronicaporfrancesco.blogspot.com.br/p/os-principais-esforcos-mecanicos.html>>. Acesso em: 20 maio 2018.

SAE BRASIL. **19 Competição SAE Brasil AeroDesign 2017**. Disponível em: <[http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas\\_estudantis/arquivos/Regulamento](http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/Regulamento)>. Acesso em: 30 de novembro de 2017.

SAE BRASIL. **AERODESIGN**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/sae-brasil-aerodesign>>. Acesso em: 25 maio 2018.