



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CÁLCULO ESTRUTURAL DE PLATAFORMAS DE ALTA ALTITUDE

Jéssica Cristine da Costa Siqueira

Relatório Parcial do Programa PBIC, orientada pelo Dr. JOSÉ ÂNGELO DA COSTA
FERREIRA NERI

INPE
São José dos Campos
2011

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**CÁLCULO ESTRUTURAL DE PLATAFORMAS DE ALTA
ALTITUDE**

Jéssica Cristine da Costa Siqueira

Relatório Parcial do Programa PBIC, orientada pelo Dr. JOSÉ ÂNGELO DA COSTA
FERREIRA NERI

INPE
São José dos Campos
2011

AGRADECIMENTOS

A Lúcia Eutímia de Q. Vianna Alves pelo apoio, esclarecimento de dúvidas e orientação durante a realização das análises no *software* SolidWorks.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos para a análise estrutural de um modelo de balão estacionário a ser utilizado no projeto SHARP (Stationary High Altitude Research Platforms) do INPE. Tal estudo foi realizado através do método dos elementos finitos com o software Solidworks. As bases teóricas e metodologia são descritas, onde se justifica a escolha da liga de alumínio 6063-T5 considerado nos cálculos computacionais. O modelo estudado possui 13 metros de comprimento, oito almas (arcos) na posição vertical e três longarinas na horizontal. Foram executadas várias análises estáticas para o critério de Von Mises, de forma a verificarem-se os efeitos de tensões (deformação, deslocamento e tensão de ruptura) sobre a estrutura. Os melhores resultados foram obtidos para a estrutura com diâmetros de 15 mm nas longarinas e de 10 mm nas almas, obtendo-se $9.172,5 \text{ N/m}^2$ para Von Mises, $1,179 \times 10^{-7}$ para a deformação, $1,356 \times 10^2 \text{ mm}$ para o deslocamento e 1,1 para o fator de segurança determinado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	7
CAPÍTULO 2 – ESTUDO DA GEOMETRIA DO MODELO DO BALÃO	9
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DA ANÁLISE ESTRUTURAL	10
3.1. Relação entre tensão e deformação	10
3.2. Fator de segurança	12
3.3. Tensão de escoamento	12
3.4. Critério de Von Mises	13
3.5. Introdução aos elementos finitos e critério de discretização de malha	14
3.6. <i>Software</i> utilizado para a análise do modelo	17
3.7. Análise estática	18
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1. Forças atuantes sobre a estrutura	19
4.2. Material escolhido	19
4.3. Resultados obtidos com diferentes geometrias do aerostato	20
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO	24
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	26

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - esboço para construção do balão	9
FIGURA 2 - (a) Ilustração da deformação positiva produzida por esforços de tração, (b) Ilustração da deformação negativa produzida por cargas compressivas, (c) Ilustração da deformação por tensão de cisalhamento e (d) Ilustração da deformação produzida por torção	11
FIGURA 3 - Tensão equivalente multiplicada pelo coeficiente de segurança	12
FIGURA 4 - Comparação entre os critérios citados	14
FIGURA 5 - Propriedades da liga 6063-T5	20
FIGURA 6 - Propriedades da liga 6063-T6	20
FIGURA 7 - Propriedades da liga 6061-T6 (SS)	20
FIGURA 8 - Propriedades da liga 6063-T4	20
FIGURA 9 - Comparação dos resultados com diâmetro idêntico nas longarinas e nas almas	21
FIGURA 10 - Comparação dos resultados com metade do diâmetro inicial nas longarinas e 1/3 nas almas	22
FIGURA 11 - Comparação dos resultados com diâmetro diminuído em 2 mm nas longarinas	23

Capítulo 1

Introdução

As demandas por serviços de telecomunicações e aplicações a partir de plataformas espaciais estão se tornando onipresentes e exigindo implantações cada vez mais versáteis e investimentos vultosos. Para atender a essa demanda estão sendo desenvolvidas as Plataformas de Grandes Altitudes (**H**igh **A**ltitude **P**lataforms) em diversos países, dentre os quais os Estados Unidos, a União Européia, a Índia, além de vários outros.

Os HAPs têm grande potencial para aplicações nas áreas de Pesquisa Espacial, Desastres, Segurança Nacional, Comunicação Militar e Comercial, Difusão via rádio (TV, rádio, internet etc), sensoriamento remoto, inteligência, vigilância, reconhecimento (ISR), GPS diferencial, além de outras aplicações. Essas plataformas têm as vantagens técnicas e comerciais dos sistemas terrestres e embarcados em satélite, sem os inconvenientes e dificuldades de ambos. O potencial de negócios a ser explorado somente no Brasil, utilizando essa técnica, é da ordem de R\$ 70 bilhões.

O projeto **SHARP** (Stationary High Altitude Research Platforms) se apresenta como um excelente veículo para pesquisa envolvendo as diferentes áreas de interesse do INPE, da área de Materiais à Astrofísica, da Propulsão ao Sensoriamento Remoto, da Meteorologia à Geofísica passando pelo LIT e Engenharia, entre outras. Tudo isto podendo ser realizado com custo muito inferior e em menor tempo comparado ao sistema convencional de satélites, com mais oportunidades de lançamentos e menos restrições de massa, volume, vibrações, dissipação, consumo ou radiações, dentre inúmeras outras a que se apresentam.

Este trabalho tem como objetivo a construção do modelo da estrutura mecânica de um balão estacionário utilizando a teoria de análise de Elementos Finitos e suas peculiaridades, propiciando a correta formulação do modelo matemático, através dos recursos existentes em softwares de elementos finitos, em particular o SolidWorks Simulation^{1,2,3}.

Para a realização do projeto da estrutura mecânica que suportará o balão a ser utilizado no projeto SHARP (Stationary High Altitude Research Platforms), será necessária a realização de estudos relacionados à geometria e aerodinâmica do balão,

assim como dos cálculos estruturais, utilizando softwares apropriados. Para simulações numéricas das deformações impostas pelos esforços aos quais tal estrutura estará submetida, utilizou-se o *software* SolidWorks Simulation, possibilitando a identificação dos elementos estruturais críticos e otimização do redimensionamento para o melhor desempenho do aerostato.

O SolidWorks Simulation permitiu a análise detalhada da estrutura do modelo, introduzindo-se os carregamentos sofridos, tensões resultantes, tipo de material e análise mais adequada a simulação dentre outros. Por fim, gerou um estudo sobre o modelo, através de simulações numéricas que disponibilizaram os resultados ⁴.

Capítulo 2

Estudo da Geometria do Modelo do Balão

O esboço utilizado para a construção do modelo é em forma de gota como mostrado na Figura 1, a partir do qual foram estudados os reforços estruturais e seus devidos espaçamentos, materiais e geometrias apropriadas.

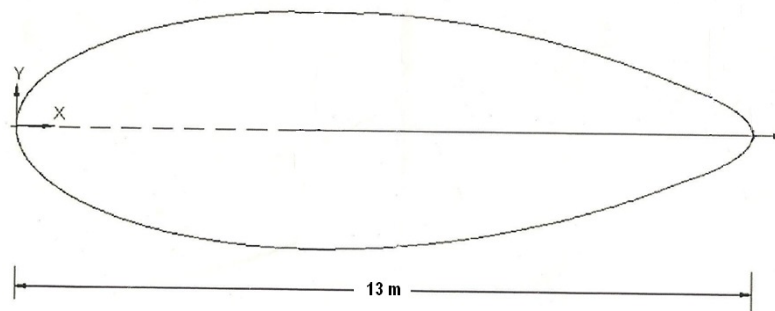


Figura 1 - Esboço para construção do balão.

Em primeira análise, definiu-se que a estrutura mecânica do balão seria composta por três longarinas na posição horizontal, defasadas entre si em um ângulo de 120° e oito almas (arcos) posicionadas na vertical e separadas umas das outras por uma distância de 1633,2 mm, sendo que a primeira alma estaria distante 425,1 mm da junção frontal, enquanto a última estaria a 1142,7 mm da junção traseira das três longarinas, conforme mostrado nas figuras 10, 11 e 12, do capítulo 4.

Capítulo 3

Metodologia da análise estrutural

3.1. Relação entre tensão e deformação

A estrutura estará sujeita forças (ou cargas) durante seu funcionamento. Portanto, torna-se necessário conhecer as características do material a ser utilizado de forma que o projeto final suporte qualquer tipo de carga aplicada durante o vôo.

O grau de deformação ou esforço da estrutura depende da intensidade da tensão imposta. Para um esforço de tração em nível baixo, a deformação é proporcional à tensão, sendo esse comportamento observado na maioria dos metais e representado de acordo com a Lei de Hooke ⁵:

$$\sigma = E \epsilon, \quad (1)$$

onde σ é a força de tração, E é o módulo de elasticidade (também é válido para cargas de compressão) e ϵ é a deformação elástica.

O módulo de elasticidade é considerado uma rigidez ou resistência do material à deformação elástica. Quanto maior esse módulo, será a deformação resultante para um dado esforço de tração. A deformação por cargas de tração produz um alongamento e uma deformação linear positiva (Figura 2a).

A deformação elástica não é permanente, ou seja, ocorre enquanto durarem os esforços sobre uma determinada estrutura, retornando a forma original após cessarem os esforços.

Esforços compressivos, torsionais ou cisalhantes possuem características semelhante aos de tração a baixos níveis de tensões, e também possuem o comportamento elástico. A relação de proporção entre tensão de cisalhamento e deformação é demonstrada a seguir:

$$\tau = G \gamma, \quad (2)$$

sendo τ a tensão de cisalhamento, G o módulo de cisalhamento, e γ a deformação elástica.

Os esforços de compressão, torsão e cisalhamento causam respectivamente, uma contração e deformação negativa, uma torsão em relação às extremidades e

deslocamentos em sentidos opostos da parte inferior e superior da estrutura (figura 2b-d).

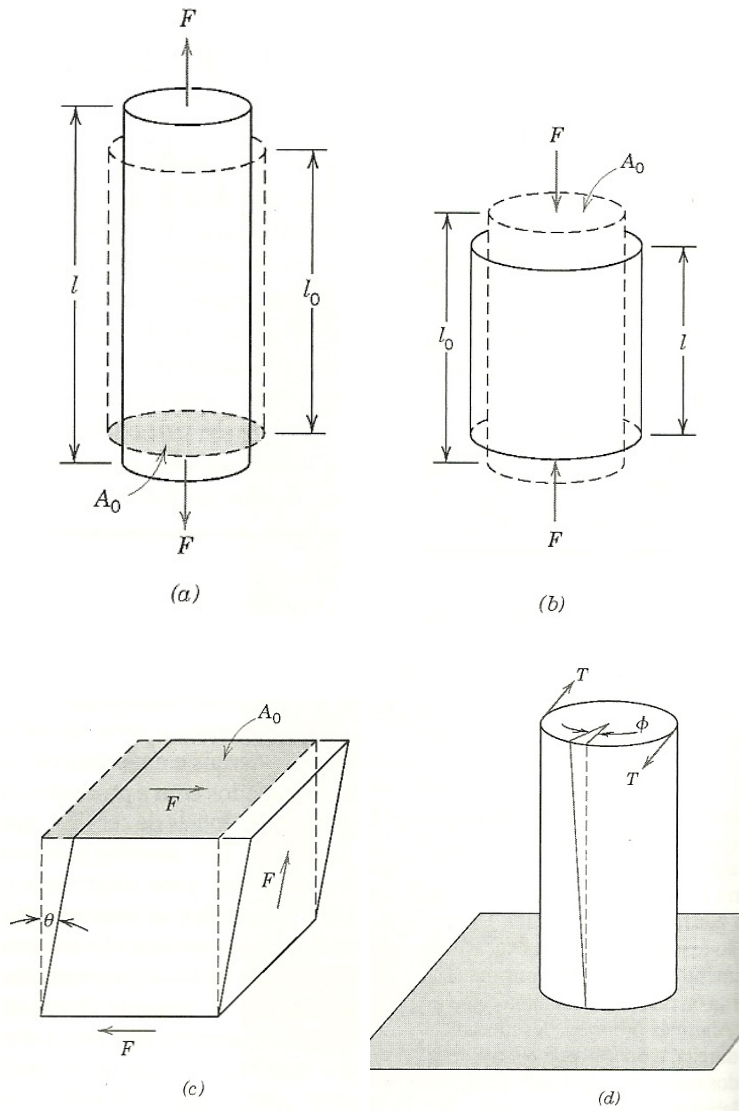


Figura 2 - (a) Ilustração da deformação positiva produzida por esforços de tração, (b) Ilustração da deformação negativa produzida por cargas compressivas, (c) Ilustração da deformação por tensão de cisalhamento e (d) Ilustração da deformação produzida por torsão ⁵.

Para a maioria dos metais, existe um limite máximo de deformação elástica de aproximadamente 0,005 , além do qual a relação de proporcionalidade entre tensão e deformação deixa de ser válida, ocorrendo deformações permanentes e irreversíveis, chamadas de deformações plásticas⁵.

O limite de resistência à tração é o ponto onde a tensão necessária para continuar a deformação plástica após o escoamento atinge seu valor máximo, após esse ponto a tensão diminui e a deformação continua até a fratura do metal.

Deformações permanentes são indesejadas devido ao fato de comprometerem a estrutura e todo seu funcionamento, ocasionando problemas em equipamentos adjacentes, o que pode acarretar para o fim de sua vida.

3.2. Fator de segurança

Todos os materiais apresentam incerteza na medida de suas propriedades mecânicas havendo, portanto, uma dispersão para os resultados obtidos. Tendo em vista a proteção contra possíveis falhas devidas a esta variação, deve-se se então estabelecer uma tensão de projeto (σ_p).

Para a estrutura dúctil σ_p é calculada de acordo com:

$$\sigma_p = \sigma_c \cdot S, \quad (3)$$

onde σ_c é a tensão calculada e S é o fator de segurança (> 1).

De acordo com as considerações acima, o material escolhido foi aquele que possuía limite de escoamento próximo a tensão de projeto σ_p .

Uma tensão de tração multiplicada pelo fator de segurança S , que leva o material a ruína por tração é chamada de tensão equivalente σ_{eq} (Figura 3) ^{5, 6}. A utilização dessa tensão é mais indicada por se basear na estimativa de uma tensão máxima aplicada ao invés de o limite de escoamento do material.

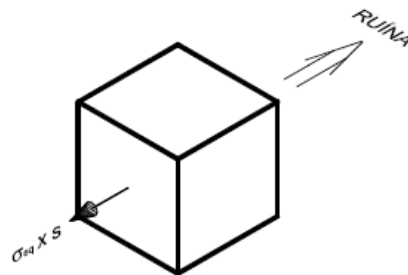


Figura 3 - Tensão equivalente multiplicada pelo coeficiente de segurança ⁶.

3.3. Tensão de escoamento

Ao projetar-se uma estrutura mecânica, uma das principais preocupações é garantir que somente a deformação elástica seja o resultado da aplicação de uma tensão. Assim, torna-se necessário conhecer qual o limite de carga suportado pela estrutura até que ocorra a deformação plástica. A intensidade da tensão onde a deformação plástica

tem início e ocorre o fenômeno do escoamento, é chamada de **tensão de escoamento** e o ponto onde ocorre a mudança de **limite de escoamento**.

Para os metais, a tensão limite de escoamento representa a resistência à deformação plástica, que varia em torno de 35 MPa para alumínio de baixa resistência⁵.

3.4. Critério de Von Mises

Ao passar dos anos foram desenvolvidos critérios relacionados à ruína do material, como exemplos temos⁶:

- 1) Teoria da máxima tensão normal proposta por Rankine;
- 2) Teoria da máxima deformação normal, proposta por Saint-Venant;
- 3) Teoria da máxima tensão de cisalhamento, proposta por Coulomb em 1773 e por Tresca em 1868;
- 4) Teoria do atrito interno, desenvolvida por Mohr e por Coulomb;
- 5) Teoria da máxima energia de distorção, desenvolvida por Huber em 1904; Von Mises em 1913 e Hencky em 1925.

Recentemente foram realizadas experiências demonstrando que algumas teorias são válidas e outras não, já que não apresentaram resultados compatíveis com os medidos experimentalmente⁶.

Para analisar a estrutura do balão, foi utilizado o critério de Von Mises, tendo em vista que sua teoria foi a mais apropriada para a ocasião por melhor se aproximar de resultados experimentais como mostra a Figura 4. Esse critério estabelece que a ruína por escoamento seja associada a valores críticos da energia de deformação do material. Quando as principais tensões assumem valores diferentes, o cubo se torna um paralelepípedo. A energia (U) para esta distorção é dada por:

$$U = \frac{1+\nu}{6 \times E} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right] \quad (4)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson.

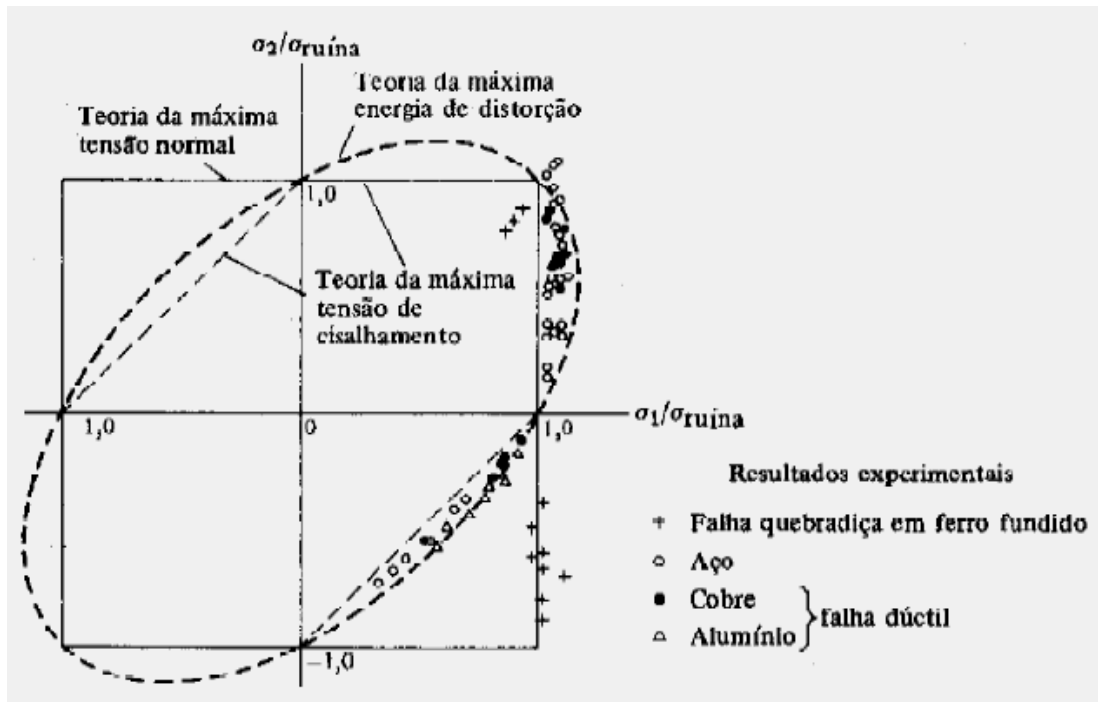


Figura 4 - Comparação entre os critérios citados ⁶.

De maneira análoga a equação (4), o mesmo acontece com a tensão equivalente para os casos $\sigma_1 = \sigma_{eq}$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$:

$$U = \frac{1+\nu}{6 \times E} \times 2 \times \sigma_{eq}^2 \quad (5)$$

Igualando as expressões (4) e (5) obtemos:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = 2 \times \sigma_{eq}^2 \quad (6)$$

E, fazendo as devidas modificações:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} = \sigma_{eq} \quad (7)$$

Esse critério vale apenas para materiais dúcteis, pois possui como tensão de ruína a tensão de escoamento ⁶.

3.5. Introdução aos elementos finitos e critério de discretização de malha

O método dos elementos finitos é uma técnica numérica que permite a divisão de um modelo em estudo em finitas partes pequenas, os elementos finitos, substituindo um

problema complexo por muitos problemas simples que devem ser resolvidos simultaneamente. Esta metodologia tem o propósito de analisar de forma mais simples a variedade de problemas complexos em engenharia, buscando soluções aproximadas para problemas de contorno. O processo de divisão dos modelos em partes pequenas é chamado de geração de malha ^{7,8}.

Esse método originou-se na indústria aeronáutica em meados da década de 60, por analisar de forma efetiva os problemas de estruturas aeronáuticas ⁷ e provém dos métodos matriciais de análise de estruturas, sendo amplamente aplicado em diversas áreas de engenharia, matemática e física ^{9,10}.

Como este método consiste em análises aproximadas, a forma de minimizar os erros torna-se relevante, devido à importância deste método. Os erros originam-se em duas fontes ⁷:

- Erros de arredondamento e truncamento: derivados de aproximações de números reais devido à limitação dos computadores e pelas manipulações feitas pelos algoritmos do programa de solução.
- Erros de discretização: ocorridos pela demonstração dos infinitos graus de liberdade do modelo físico por um de finitos relacionados ao sistema de discretização.

Para diminuir e estimar os erros de discretização foi utilizado o método da extrapolação de Richardson, que verifica a incerteza da solução numérica Φ_1 utilizando ¹¹:

$$U_{Ri} = \Phi_{\infty} - \Phi_1, \quad (8)$$

onde Φ_{∞} é obtido da **extrapolação de Richardson** generalizada, ou seja, é o valor da solução analítica exata, dada por:

$$\Phi_{\infty} = \Phi_1 + \frac{(\Phi_1 - \Phi_2)}{q^p - 1}, \quad (9)$$

sendo q dado por:

$$q = \frac{h_2}{h_1}. \quad (10)$$

onde U_{Ri} = incerteza de Φ_1 ; Φ_2 = solução numérica da malha grossa (h_2); Φ_1 = solução numérica da malha fina (h_1); Φ_{∞} = solução numérica extrapolada; h_2 =

comprimento dos volumes de controle da malha grossa; h_1 = comprimento dos volumes de controle da malha fina; q = razão de refino entre as malhas h_2 e h_1 ; p = ordem de convergência espacial (esta influencia diretamente o estimador de Richardson) teórica (p_t), aparente (p_a) ou assintótica (p_∞).

A **ordem teórica (p_t)** é resultante da análise da discretização do modelo matemático utilizando-se a série de Taylor.

A **ordem aparente (p_a)** é calculada baseando-se em três soluções numéricas resultantes de três malhas diferentes. Para razões de refino de malha constante e variável entre as três malhas, respectivamente, tem-se as equações:

$$p_a = \frac{[(\Phi_2 - \Phi_3) / (\Phi_1 - \Phi_2)]}{\ln(q)} \quad (\text{para } q = Q) \quad (11)$$

$$p_a = \frac{\ln[\psi(q^{p_a} - 1) / (Q^{p_a} - 1)]}{\ln q} \quad (\text{para } q \neq Q) \quad (12)$$

onde p_a = ordem de convergência espacial aparente; Φ_3 = solução numérica da malha supergrossa (h_3); Φ_2 = solução numérica da malha grossa (h_2); Φ_1 = solução numérica da malha fina (h_1).

Sendo:

$$\psi = \frac{\Phi_2 - \Phi_3}{\Phi_1 - \Phi_3} \quad (13)$$

e,

$$Q = \frac{h_3}{h_2} \quad (14)$$

onde , h_3 = comprimento dos volumes de controle da malha supergrossa; h_2 = comprimento dos volumes de controle da malha grossa; Q = razão de refino entre as malhas h_3 e h_2 .

Para o casos de refino de malha variável ($q \neq Q$), o cálculo de p_a com a equação 12 se torna iterativo porque essa equação é transcendental. Através das equações 11,12 e 13, percebe-se que soluções numéricas (Φ) diferentes resultam em valores diferentes da ordem aparente (p_a). Tanto a acurácia quanto a confiabilidade da incerteza de uma solução numérica estão intimamente ligadas à função $p_a(h)$.

A **ordem assintótica** (p_∞) é o valor para o qual converge a ordem aparente (p_a) quando h tende a zero, assim:

$$p_\infty = \lim_{h \rightarrow 0} (p_a) \quad (15)$$

Pode-se demonstrar que a extrapolação de Richardson, equação (8) é o resultado da soma dos termos de uma série geométrica infinita, denominada de série de Richardson (R_∞):

$$\Phi_\infty = \Phi_1 + R_\infty (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (16)$$

sendo,

$$R_\infty = \frac{1}{\psi} + \frac{1}{\psi^2} + \frac{1}{\psi^3} + \dots \quad (\text{série de Richardson}) \quad (17)$$

e,

$$\psi = q^p \quad (18)$$

Para $\psi < -1$ e $\psi > 1$, esta série converge para valores finitos que são dados por:

$$R_\infty = \frac{1}{(\psi - 1)} \quad (22)$$

Considerando-se razão de refino de malha constante, a extrapolação de Richardson (equação 8) e o estimador de Richardson (equação 9) são válidos apenas para razão de convergência maior do que um ($\psi > 1$), o que equivale a $p > 0$. Esta condição é automaticamente satisfeita para as ordens teóricas e assintóticas das funções de interpolação normalmente empregadas; mas isso não ocorre no caso da ordem aparente, que pode assumir valores positivos ou negativos ou ser indefinida.

3.6. Software utilizado para a análise do modelo

Para a elaboração do modelo estrutural do aerostato foi utilizado o *software* de automação de projetos mecânicos SolidWorks, que usufrui da interface gráfica do usuário conhecida do Microsoft Windows. É uma ferramenta de fácil compreensão e manuseio que permitiu esboçar idéias com rapidez, fazer os testes com recursos, dimensões e modelos de desenhos detalhados. Dentro desse aplicativo, existe um sistema de análise de projetos estruturais chamado Simulation, que fornece soluções para análises térmica, de tensão, frequência, flambagem e otimização. O SolidWorks

Simulation utilizou solvers rápidos, tornando possível a solução de problemas complexos.

O modelo estudado geralmente está sujeito a diferentes ambientes de serviço, carregamentos e a condições de operações durante sua vida útil. Deste modo, é importante testar propriedades de materiais diferentes, assim como cargas e limite durante a análise do modelo. Para isso, o aplicativo utilizou o Método de Elementos Finitos (MEF). O MEF é uma técnica numérica para a análise de projetos de engenharia é aceito como método padrão de análise devido à sua generalidade e por ser bastante adequado para implementação em computadores ^{4, 8}.

3.7. Análise estática

Pra se fazer a análise de tensões na estrutura do balão, foi utilizada a análise estática linear, pois envolve a aplicação de cargas lentas e uniformes por toda a superfície da estrutura que se mantém constantes ao atingir sua magnitude total. Com a análise estática linear pode-se calcular os deslocamentos, deformações, tensões e forças de reação sob o efeito das cargas aplicadas. Com esta suposição foi possível ignorar forças de inércia e amortecimento causadas por acelerações e velocidades de valor desprezível, tendo em vista que o balão será estacionário.

A análise linear demonstrou que se as cargas forem aumentadas em duas vezes, a resposta também será duplicada, pois o modelo atende a Lei de Hooke. As condições de limite não variam durante a aplicação das cargas. As cargas devem ser constantes em magnitude, direção e distribuição. Elas não sofrem alteração enquanto o modelo está sendo deformado ¹².

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1. Forças atuantes sobre a estrutura

O projeto do aeróstato envolve diversas áreas do Instituto como Materiais, Astrofísica, da Propulsão ao Sensoriamento Remoto, da Meteorologia à Geofísica passando pelo LIT e Engenharia, entre outras. Com isso, é sabido que o balão terá outras partes que serão integradas a ele durante as fases do projeto, deste modo, foi estimado como peso inicial (carga) de equipamento(s) o valor de 150 kg. Dos quais foram distribuídos em quatro pontos que simulam onde o mesmo estará concentrado. Os pontos estão localizados nas intersecções da terceira alma (da esquerda pra direita e vice-versa) com as longarinas na parte inferior do aerostato.

Às cargas foram decompostas em quatro forças cada uma em um ângulo de 45° , o que resultou em três forças nas dimensões x, y e z em cada ponto com o valor de 25.3N.

A estrutura também está submetida à força da gravidade uma vez que ficará suspensa no ar, e ao seu próprio peso (do material em relação à geometria escolhida) que é de 32 kg (fornecido pelo software) e representadas através de acessórios de fixação.

4.2. Material escolhido

O banco de dados do software é muito rico quanto a ligas metálicas, dentre as diversas existentes concluiu-se que as ligas de alumínio que melhor atendiam ao requisito estrutural do modelo por serem mais leves, mais resistentes e de fácil usinagem. Os itens mais relevantes das propriedades destas ligas para o caso deste projeto foram os valores do módulo de cisalhamento, da resistência à tração e do limite de escoamento. A seguir é demonstrada a comparação entre as quatro ligas mais apropriadas e que se aproximam dos valores umas das outras (Figuras 5, 6, 7, 8).

Propriedades do material

Os materiais na biblioteca predeterminada não podem ser editados. Você precisa copiar o material para uma biblioteca personalizada para poder editá-lo.

Tipo de modelo:

Unidades:

Categoria:

Nome:

Critério de falha predeterminado:

Descrição:

Origem:

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.9e+010	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.33	N/A
Módulo de cisalhamento	2.58e+010	N/m ²
Densidade	2700	kg/m ³
Resistência à tração	185000000	N/m ²
Resistência à compressão em X		N/m ²
Limite de escoamento	145000000	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica	2.34e-005	/K
Condutividade térmica	209	W/(m·K)
Calor específico	900	J/(kg·K)
Razão de Amortecimento do Material		N/A

Figura 5 - Propriedades da liga 6063-T5

Propriedades do material

Os materiais na biblioteca predeterminada não podem ser editados. Você precisa copiar o material para uma biblioteca personalizada para poder editá-lo.

Tipo de modelo:

Unidades:

Categoria:

Nome:

Critério de falha predeterminado:

Descrição:

Origem:

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.9e+010	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.33	N/A
Módulo de cisalhamento	2.58e+010	N/m ²
Densidade	2700	kg/m ³
Resistência à tração	240000000	N/m ²
Resistência à compressão em X		N/m ²
Limite de escoamento	215000000	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica	2.34e-005	/K
Condutividade térmica	209	W/(m·K)
Calor específico	900	J/(kg·K)
Razão de Amortecimento do Material		N/A

Figura 6 - Propriedades da liga 6063-T6

Propriedades do material

Os materiais na biblioteca predeterminada não podem ser editados. Você precisa copiar o material para uma biblioteca personalizada para poder editá-lo.

Tipo de modelo:

Unidades:

Categoria:

Nome:

Critério de falha predeterminado:

Descrição:

Origem:

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.900000067e+010	N/m ²
coeficiente de Poisson	0.33	N/A
Módulo de cisalhamento	2.600000013e+010	N/m ²
Massa específica	2700	kg/m ³
Resistência à tração	310000002.1	N/m ²
Resistência à compressão em X		N/m ²
Limite de escoamento	275000000.9	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica	2.4e-005	/K
Condutividade térmica	166.9	W/(m·K)
Calor específico	896	J/(kg·K)
Razão de Amortecimento do Material		N/A

Figura 7 - Propriedades da liga 6061-T6 (SS)

Propriedades do material

Os materiais na biblioteca predeterminada não podem ser editados. Você precisa copiar o material para uma biblioteca personalizada para poder editá-lo.

Tipo de modelo:

Unidades:

Categoria:

Nome:

Critério de falha predeterminado:

Descrição:

Origem:

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.9e+010	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.33	N/A
Módulo de cisalhamento	2.58e+010	N/m ²
Densidade	2700	kg/m ³
Resistência à tração	170000000	N/m ²
Resistência à compressão em X		N/m ²
Limite de escoamento	90000000	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica	2.34e-005	/K
Condutividade térmica	200	W/(m·K)
Calor específico	900	J/(kg·K)
Razão de Amortecimento do Material		N/A

Figura 8 - Propriedades da liga 6063-T4

Como pode ser observada, a liga 6063-T6 (SS) possui maiores valores de módulo de cisalhamento, resistência a tração e limite de escoamento do que as ligas T4, T5 e T6, logo seria a mais indicada para a ocasião, contudo, esta liga é demasiadamente cara, sendo portanto descartada a hipótese de sua utilização (o mesmo ocorre para -T6). Sendo assim, a liga com o maior potencial torna-se a -T5, que atende as necessidades do projeto e tem um custo muito mais atrativo.

4.3. Resultados obtidos com diferentes geometrias do aerostato

Após a definição de geometria do balão descrita no Capítulo 2, a escolha do material e a determinação das cargas as quais o balão estará exposto, partiu-se então

para a análise da estrutura. Para isso, foi proposta somente a análise estática da estrutura, para que se pudesse observar a resposta de seu comportamento tal como deformação e deslocamento para as tensões impostas. Utilizou-se a princípio, um diâmetro razoável e idêntico para as longarinas e almas, e o resultado encontra-se na Figura 9.

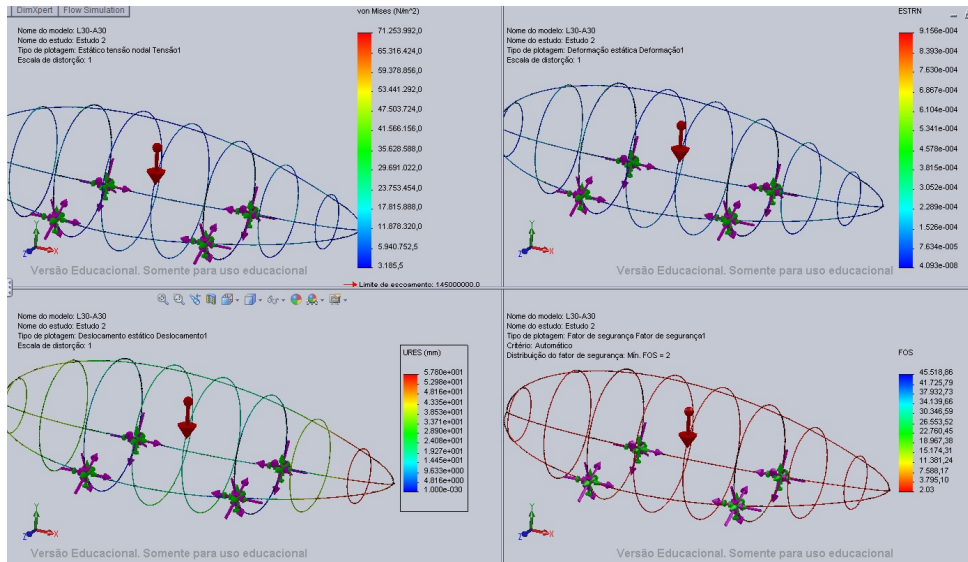


Figura 9 - Comparação dos resultados com diâmetro idêntico nas longarinas e nas almas.

Pode-se observar que os valores para o critério de Von Mises (retângulo superior esquerdo) estão entre $71.253.992,0 \text{ N/m}^2$ (máximo) com coloração vermelha e $3.185,5 \text{ N/m}^2$ (mínimo) com coloração azul. O modelo apresentou uma coloração azul escura, que significa que a tensão equivalente ou de ruptura está na faixa mínima, ou seja, muito abaixo do que pode ser suportado.

O resultado obtido para a deformação (retângulo superior direito) fica em $9,156 \times 10^{-4}$ (máximo) com coloração vermelha e $4,093 \times 10^{-8}$ (mínimo) com coloração azul escuro. Neste caso, a estrutura também apresentou uma coloração que indica o valor mínimo de deformação, uma quantia desprezível tendo em vista a dimensão do balão de 13 metros.

No canto inferior esquerdo encontra-se a análise de deslocamento, a maioria da estrutura apresenta a cor verde que possui números médios em torno de $2,408 \times 10^1 \text{ mm}$ e a parte traseira possui a cor vermelha, o que indica o deslocamento máximo de $5,78 \times 10^1 \text{ mm}$. Outra vez os resultados são mais do que satisfatórios, pois o deslocamento é muito pouco se comparando o tamanho do modelo.

O fator de segurança apresenta valor de 2,03, o que está acima mínimo (2,00) para toda estrutura, o que significa que está superdimensionado.

De um modo geral, observou-se que os resultados estão próximos aos números mínimos, o que mostra um superdimensionamento, assim, foi possível diminuir os diâmetros da estrutura para a metade nas longarinas e 1/3 nas almas, a fim de se obter resultados mais baixos (Figura 10).

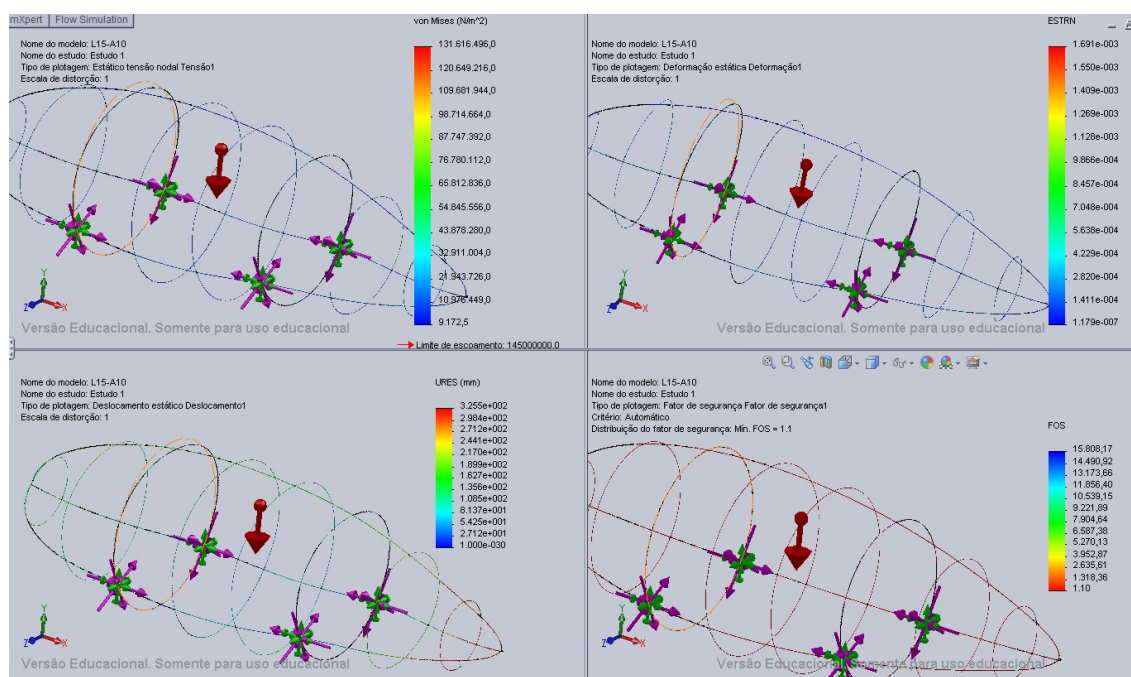


Figura 10 - Comparação dos resultados com metade do diâmetro inicial nas longarinas e 1/3 nas almas.

Praticamente o mesmo resultado do estudo anterior para o critério de Von Mises (parte superior esquerda) foi observado para este caso. A coloração resultante é azulada e o valor está aproximadamente em $9.172,5 \text{ N/m}^2$.

O estado de deformação é novamente desprezível comparado à dimensão do balão, como pode ser observada na parte superior direita, a coloração azul obtida representa o valor mínimo de $1,179 \times 10^{-7}$.

No canto inferior esquerdo nota-se valores médios coloração verde para deslocamento por volta de $1,356 \times 10^2 \text{ mm}$, o que é um valor pequeno relacionando-o com a geometria do balão. Por fim, o retângulo inferior direito mostra que o fator de segurança está adequado para a situação, pois está próximo do valor mínimo de 1,1.

O estudo desta geometria mostrou resultados mais satisfatórios por estar abaixo dos anteriormente obtidos e ainda assim, acima do esperado. Como prova de que estes valores estariam apropriados, diminuiu-se ainda mais o diâmetro das longarinas, agora retirou-se 2 mm e foi gerado um novo estudo sobre a estrutura (Figura 11).

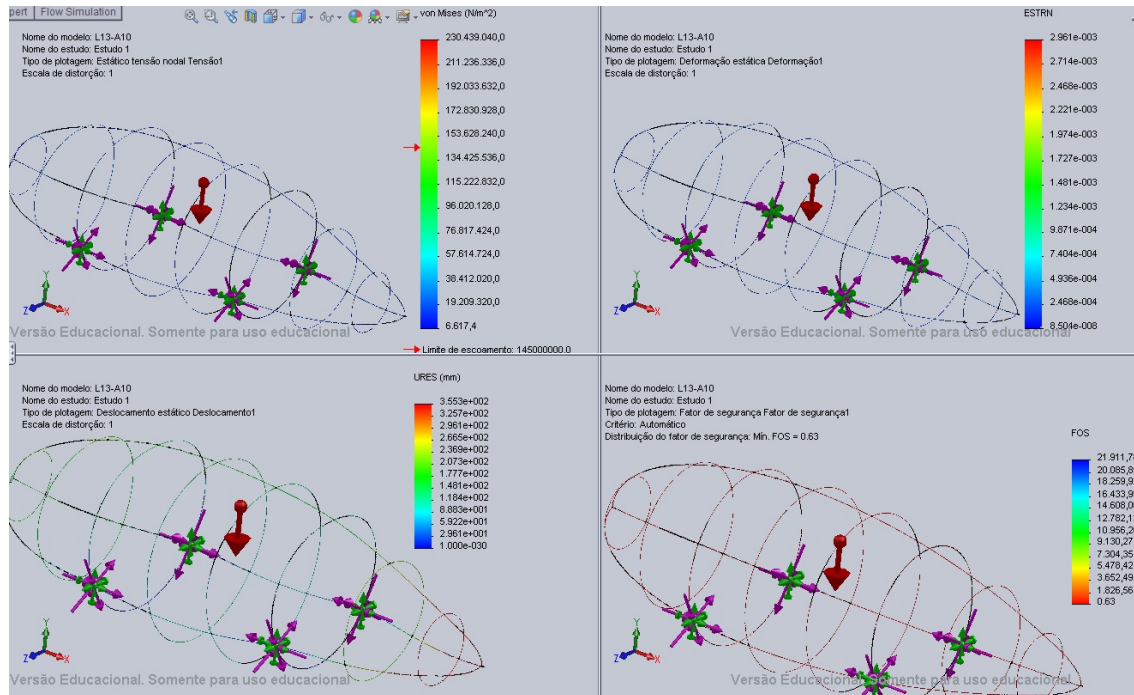


Figura 11 - Comparação dos resultados com diâmetro diminuído em 2 mm nas longarinas.

Os resultados obtidos para esta nova geometria também foram muito satisfatórios, pois o critério de Von Mises (quadro superior esquerdo) continua entre o mínimo de $6.617,4 \text{ N/m}^2$, apresentando uma cor azulada. O valor de deformação (quadro superior direito) que neste caso está em $8,504 \times 10^{-8}$ (valor mínimo) para toda a estrutura. Para o valor de deslocamento (quadro inferior esquerdo), observou-se uma cor esverdeada que representa a média de aproximadamente $1,481 \times 10^2 \text{ mm}$ e $3,257 \times 10^2$ para a parte traseira, que ainda é pequeno, pois o comprimento da estrutura é o mesmo. Finalmente, o fator de segurança agora de 0,63 (quadro inferior direito) diminuiu bem, mas ainda está adequado por estar próximo ao mínimo esperado.

Mesmo obtendo-se bons resultados com a menor geometria apresentada, optou-se por escolher a segunda dimensão de estrutura apresentada como a mais apropriada, por seus resultados ficarem na média, nem superdimensionado, nem com valores distantes da primeira tentativa.

Capítulo 5

Conclusão

Este trabalho de iniciação científica possui o objetivo da construção do modelo da estrutura mecânica de um balão estacionário utilizando a teoria de análise de Elementos Finitos através de softwares com recursos apropriados, neste caso foi utilizado o Solidworks Simulation.

Foi construído um modelo em três dimensões da estrutura do aerostato que é composta de três longarinas posicionadas horizontalmente, oito almas na vertical e com comprimento total de 13 metros, utilizou-se para isso o Solidworks.

Os fundamentos e teorias adotados durante a execução do estudo da estrutura e bem como sua análise, foram sucintamente descritos no capítulo de metodologia.

Com a necessidade de se obter uma estrutura leve e resistente, foi utilizada a liga de alumínio 6063-T5, que em comparação com outras do mesmo tipo, fornece o requisito necessário para sua utilização tendo um custo mais baixo, sendo assim, seu uso foi mais atrativo do que as outras.

O estudo sobre a estrutura envolveu a análise estática, pois permite que se descubra o seu comportamento perante as tensões impostas da qual o modelo estará exposto, podendo então, observar seu deslocamento, deformação, tensão de ruptura e o fator de segurança com cargas que não variaram com o tempo. Também foi adicionada a força de gravidade observando que o balão ficará estacionado no ar, o peso de equipamentos adicionais e o peso da sua própria estrutura.

Obtiveram-se resultados satisfatórios, porém com a hipótese de estarem superdimensionados com o primeiro diâmetro nas longarinas e almas. Os valores obtidos do critério de Von Mises, deformação e deslocamento foram respectivamente $3.185,5 \text{ N/m}^2$, $4,093 \times 10^{-8}$, $2,408 \times 10^1 \text{ mm}$ valor médio para a maior parte da estrutura e $5,78 \times 10^1 \text{ mm}$ na parte traseira. O fator de segurança também encontra-se dentro do esperado, o que representa seu correto dimensionamento.

A fim de otimizar os resultados e diminuir o peso do modelo em questão, foi feito um novo estudo sobre a estrutura com diâmetros menores, longarinas e almas. Os resultados obtidos foram bons, marcando $9.172,5 \text{ N/m}^2$ para critério de Von Mises,

$1,179 \times 10^{-7}$ para a deformação, $1,356 \times 10^2$ mm para deslocamento médio e novamente um valor dentro do mínimo de 1,1 para fator de segurança. Essa geometria demonstrou melhores resultados se comparado a dimensão anterior, pois possui valores menores reduzindo o super dimensionamento.

Para comprovar que esta estrutura estaria em melhor concordância com o projeto, diminuiu-se em 2 mm o diâmetro das longarinas, e analisou-se o resultado. Para esta análise obteve-se $6.617,4 \text{ N/m}^2$ para Von Mises, $8,504 \times 10^{-8}$ de deformação, um deslocamento de $1,481 \times 10^2$ mm e fator de segurança adequado de 0,63.

Como os valores resultantes de todas as análises foram satisfatórios, optou-se por escolher a segunda geometria como a mais apropriada, devido ao fato de seus resultados ficarem abaixo dos obtidos primeiramente e estar ligeiramente acima dos obtidos por último.

Futuramente, poderão ser analisados modelos diferentes, com mais almas e/ou longarinas, porém com o diâmetro menor e etc, a fim de obter-se a melhor estrutura para o balão estacionário. Também serão feitas novas análises com tensões e considerações diferentes da adotada neste trabalho, como a análise dinâmica por exemplo, bem como a análise de forças resultantes aerodinâmicas sobre a estrutura.

Referências bibliográficas

- [1] - T. C. Tozer and D. Grace, "High-altitude platforms for wireless communications," *IEE Electronics & Communication Engineering Journal*, vol.13,no.3,pp.127{137,2001}.
- [2] - R. A. Fesen, "A high-altitude station-keeping astronomical platform," *Proc. SPIE* 6267, 62670T (2006).
- [3] - A. Moutinho, "Modeling and nonlinear control for airship autonomous flight", PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal, December 2007.
- [4]- Fundamentos do SolidWorks. Em: *Ajuda do solidWorks: fundamentos do SolidWorks*. Versão 2011.
- [5]- Propriedades mecânicas dos materiais. Em: Calister, W. D. J. *Ciência e Engenharia dos materiais: uma introdução*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. p. 79-100.
- [6]- Aula de critérios de resistência. Em: Morilla, J. C. *Resistência dos materiais: Critérios de Resistência II*. Universidade Santa Cecília. Engenharia Mecânica. p. 9.
- [7]- Introdução. Em: Nogueira, C. F. *Refinamento local do campo de tensões no método de elementos finitos*. 1987. p. 1-7. Tese de mestrado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo.
- [8]- Conceitos básicos de análise. Em: *Ajuda do SolidWorks: fundamentos do simulation*. Versão 2011.
- [9]- The finite element methods. In: Bathe, K. J. *Numerical methods in finite element analysis*. 1 ed. New Jersey: Prentice-Hall, INC.,1976. p. 71-79.
- [10]- Bathe, K. J. *Finite element procedures*. 1 ed. New Jersey: Prentice-Hall,INC., 1996. p.
- [11]- Marchi, C. H.; Silva, F. C. *Condições suficientes para estimar com acurácia e confiabilidade erros de discretização em CFD* . 1999. P. 20.
- [12]- Análise estática linear. Em: *Ajuda do SolidWorks: simulation - informações básicas sobre análises*. Versão 2011.