

## ANÁLISE ESTRUTURAL DA CONCEPÇÃO PRELIMINAR DO CILINDRO DOS EXPERIMENTOS DO MÓDULO DE EXPERIMENTAÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E FEMAP/NASTRAN

**Artur C. Arantes Filho<sup>1</sup>, Denis G. Vieira<sup>2</sup>, Luis Eduardo V. Loures da Costa<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço / ASE, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Campus do CTA - Vila das Acácias CEP 12228-904 - São José dos Campos - SP - Brasil, e-mail: artur\_arantes@hotmail.com

<sup>2</sup>IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço / ASE, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Campus do CTA - Vila das Acácias CEP 12228-904 - São José dos Campos - SP - Brasil, e-mail: denisgvieira@yahoo.com.br

<sup>3</sup>IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço / ASE, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Campus do CTA - Vila das Acácias CEP 12228-904 - São José dos Campos - SP - Brasil, e-mail: loures@iae.cta.br

**Resumo** - O artigo apresenta a análise estrutural de carregamento estático da concepção preliminar da geometria externa do Cilindro dos Experimentos, parte integrante do Módulo de Experimentação do projeto SARA Suborbital, realizado pela FINEP e IAE. O estudo consiste em uma análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o software FEMAP VisualNastran / Nastran, apresentando os resultados (output) das respostas estruturais devido aos carregamentos impostos ao cilindro durante o seu ciclo de vida. Fatores limitantes e possíveis modificações a concepção da estrutura do cilindro serão apresentados e estudados com o intuito de uma possível melhoria.

**Palavras-chave:** Análise, Estrutural, FEMAP, MEF, NASTRAN

**Área do Conhecimento:** Engenharias

### Introdução

A comunidade científica no Brasil dispõe, atualmente, de dois meios para realizar suas pesquisas em ambiente de microgravidade: os foguetes de sondagem e a utilização da Estação Espacial Internacional (ISS). Cada um desses meios possui limitações consideráveis. Os foguetes de sondagem permitem ambientes em microgravidade de apenas seis minutos, se o vôo for realizado em condições perfeitas. Já a ISS permite o tempo que for necessário, porém, é preciso fazer uma cooperação com a Rússia ou Estados Unidos (únicos países que transportam passageiros a ISS), além de treinar um astronauta brasileiro ou estrangeiro para a realização dos experimentos. Tudo isso torna o custo de operação elevado.

Como uma alternativa, o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE/CTA) e a FINEP estão desenvolvendo um satélite recuperável, chamado Projeto SARA (Satélite de Reentrada Atmosférica). A idéia é construir uma plataforma em forma de cápsula que seja colocada em órbita por um veículo lançador (VS-40 ou VS-43) por um determinado período. Depois de realizados os experimentos propostos, essa plataforma retorna à Terra, onde poderá ser recuperada e reutilizada. A vantagem desse sistema é o tempo de duração, que poderá ser controlado, e os custos operacionais reduzidos, além do desenvolvimento de tecnologia nacional.

O projeto inclui como metas intermediárias, a realização de dois projetos de

veículos suborbitais (SARA Suborbital) a serem lançados, de maneira a permitir um alcance paulatino da tecnologia necessária. Estes subprojetos constituem a etapa ativa do projeto durante a sua fase de realização. O projeto SARA Suborbital está segmentado em subsistemas: Subsistema Estrutural; Subsistema de Redes Elétricas; Subsistema de Recuperação; e Módulo de Experimentação.

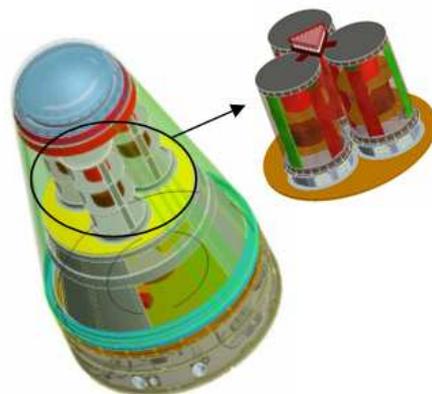


Figura 1: Módulo de Experimentação em destaque no SARA Suborbital

O Módulo de Experimentação (MEXP) em destaque na Figura 1, é responsável pela acomodação dos experimentos científicos e de pesquisa tecnológica que possam elucidar fenômenos que ocorrem no ambiente espacial, na ausência aparente da atração gravitacional. Para isso sua estrutura deverá garantir a hermeticidade do sistema, sem ocorrências de falhas estruturais

durante todo o ciclo de vida do SARA Suborbital [1]. Com esse intuito esse trabalho foi desenvolvido visando uma análise estrutural do MEXP com o objetivo de validar a concepção preliminar adotada e apresentar possíveis modificações.

## Metodologia

A análise estrutural preliminar do Módulo de Experimentação (MEXP) consiste no estudo apenas no Cilindro dos Experimentos, Figura 2, essa análise preliminar faz parte da seqüência adotada dos estudos estruturais para o MEXP [1], onde a primeira análise estrutural tem o objetivo de apresentar os resultados referentes aos estudos estáticos da estrutura, deixando para uma etapa seguinte os estudos dinâmicos (vibracionais senoidal e aleatória), onde se faz necessário à análise de todo o MEXP.

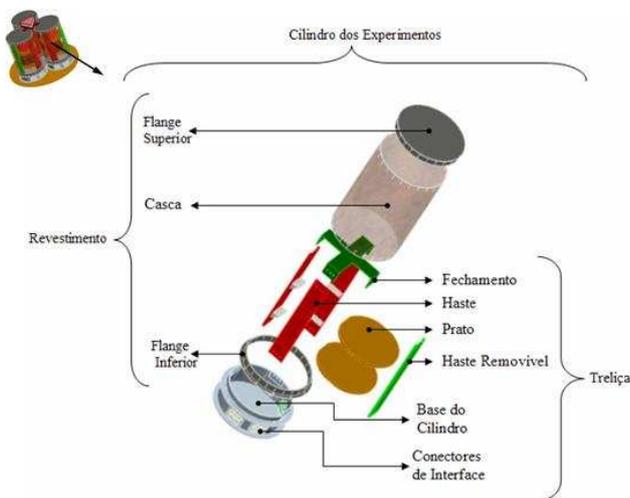


Figura 2: Cilindro dos Experimentos

Nessa primeira etapa de estudo onde o foco do trabalho é direcionado para o Cilindro dos Experimentos, ocorreu a divisão do trabalho em duas frentes, a análise externa do cilindro e a análise interna do cilindro. Esse artigo traz referências aos estudos realizados na estrutura externa do cilindro, englobando as seguintes partes: Base; Flange Inferior; Flange Superior e Casca, veja Figura 2.

O estudo consiste na análise estrutural através do Método dos Elementos Finitos [2] utilizando o software FEMAP 8.2.1 VisualNastran / Nastran, onde os cálculos realizados através do software são efetuados por vetores de força, deslocamento e a matriz global, possuindo o input do Módulo de Young, Poisson e dos Elementos utilizados [3], seguindo basicamente o equacionamento de matrizes e vetores de deslocamento;  $\{F\} = [K] \cdot \{a\}$  - onde  $\{F\}$  é o vetor de forças atuantes e reações,  $[K]$  é a matriz global e  $\{a\}$  é o vetor de deslocamentos dos nós [4] [5].

Para esse caso, foi adotada a propriedade de elemento de sólido e Malha Tetraedro ("Tetrahedral Mesh") [6], utilizando para as partes: Base; Flange Inferior e Flange Superior, o material Alumínio 7475-T651, onde a tensão de escoamento do material é 510 MPa e a tensão máxima admissível é 586 MPa [7], e para a parte da Casca o material compósito de laminado  $[90:\pm 45:0]$  de Carbono de 2mm de espessura, com tensão de tração máxima admissível em torno de 1270 MPa e tensão de compressão máxima admissível em torno de 1130 MPa [8]. Para o sólido formado pelo laminado de Carbono foram utilizadas propriedades equivalentes do material, obtidas através do equacionamento de matrizes que relacionam direção das fibras do carbono, quantidade de laminas utilizadas e propriedades das laminas isoladas do sistema.

A geometria do Cilindro dos Experimentos foi importada do software Pro/E (Pro/Engineer) no formato ACIS (.sat), onde antes da importação foram realizadas modificações para a adaptação da geometria e utilização no FEMAP VisualNastran. Com a geometria confeccionada e importada do Pro/E, foi iniciada a análise com as condições de contorno, possíveis carregamentos pré-estudados que a estrutura poderá sofrer durante o seu ciclo de vida e a criação da malha Tetraedro. A seqüência para a realização do estudo e modelamento pode ser observada na Figura 3 [9].

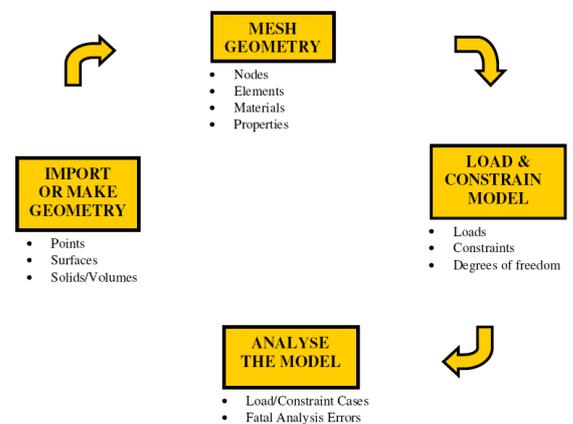


Figura 3: Seqüência de ações realizadas no FEMAP para a análise estrutural

Para a análise realizada no NASTRAN o Cilindro dos Experimentos é constituído por uma malha Tetraedro formado por 90168 nós e 268122 elementos, mantendo a atenção direcionada para uma malha refinada onde há furação e possíveis pontos de concentração de tensão.

## Resultados

O estudo desse trabalho tomou como base a identificação de pontos no modelo do Cilindro dos Experimentos onde possam ocorrer concentrações de tensão que excedam o limite da tensão de escoamento do material.

Assim com o modelamento da geometria, Figura 4, foram inseridos carregamentos estáticos, longitudinais e transversais, simulando as tensões (compressão, tração, cisalhamento) ocorrentes durante o ciclo de vida do Cilindro dos Experimentos, com o objetivo de identificar os pontos propícios a ocorrência de colapso estrutural da concepção preliminar da geometria adotada [10].

A utilização de uma malha detalhada (refinada) nos locais de furação e fixação, Figura 5, trouxe um ótimo resultado em referência as tensões de resposta oriundas das forças atuantes simuladas.

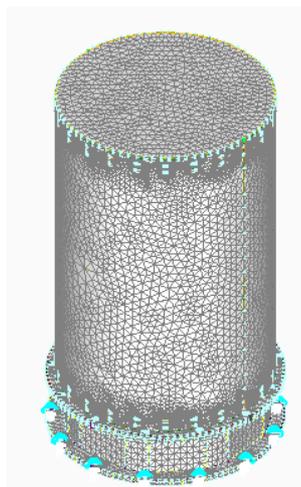


Figura 4: Cilindro dos Experimentos, com Malha Tetraedro e Condições de Contorno.

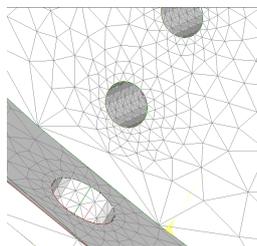


Figura 5: Cilindro dos Experimentos, com Malha Tetraedro e refinamento da malha nas regiões das furações e fixações.

Foram aplicados carregamentos longitudinais e transversais ao cilindro com grandezas distintas, simulando possíveis forças atuantes no transporte do MEXP integrado ao SARA, durante o lançamento, abertura do pára-quadras e reentrada do SARA Suborbital. Foi aplicado também o máximo carregamento

suportado pela geometria preliminar do cilindro com o intuito de obter os resultados dos limites das tensões suportadas, sem a ocorrência de deformação plástica.

Assim o resultado com o carregamento limite (máximo) transversal para o material do cilindro foi obtido, podendo ser observado na Figura 6, contendo as concentrações de tensões e o deslocamento exagerado da estrutura.

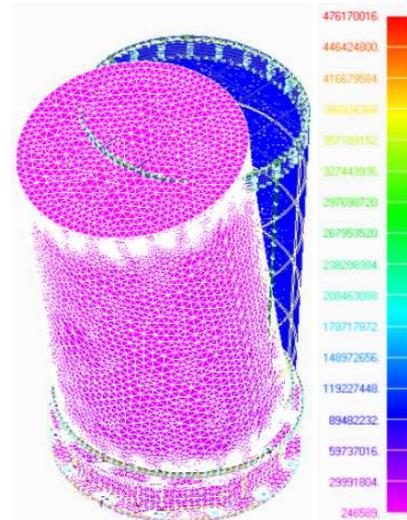


Figura 6: Cilindro dos Experimentos com carregamento limite transversal.

A Figura 7 apresenta a localidade da fixação da Flange Inferior com a Base, onde há máxima concentração de tensão no cilindro com aplicação do carregamento limite transversal.

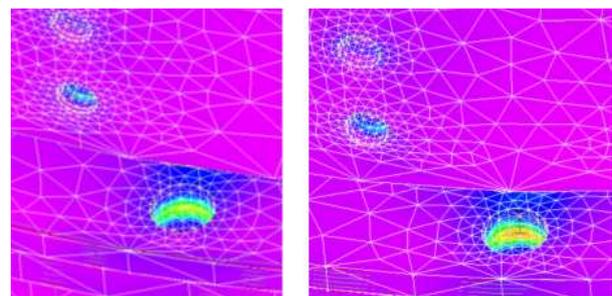


Figura 7: Máxima concentração de Tensão no cilindro com carregamento transversal.

Aplicação do carregamento limite longitudinal de compressão foi adotado para a geometria devido ao fato da ocorrência de possíveis pontos de concentrações de tensões e a possibilidade do material compósito sofrer delaminação [8] em decorrência da compressão.

O resultado obtido a partir da aplicação do carregamento limite longitudinal de compressão pode ser observado na Figura 8, contendo as concentrações de tensões e o deslocamento exagerado da estrutura.

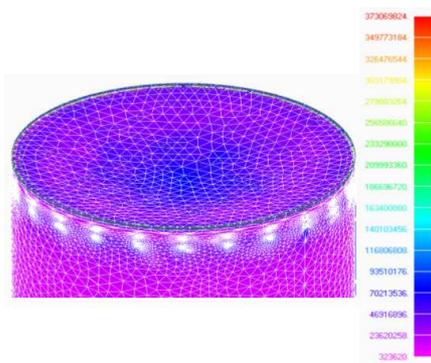


Figura 8: Cilindro dos Experimentos com carregamento limite longitudinal.

A Figura 9 apresenta a localidade da fixação da Flange Superior com a Casca, onde há máxima concentração de tensão no cilindro com aplicação do carregamento limite longitudinal.

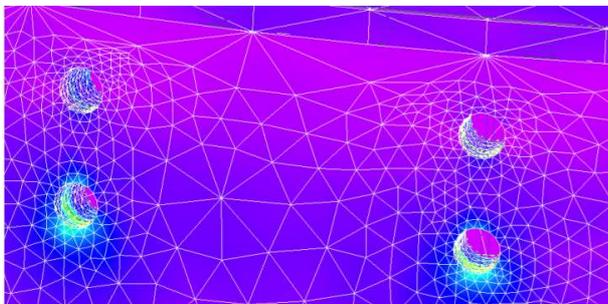


Figura 9: Máxima concentração de Tensão no cilindro com carregamento longitudinal.

A Figura 10 apresenta a localidade da fixação da Flange Inferior com a Base, onde também há máxima concentração de tensão no cilindro com aplicação do carregamento limite longitudinal.

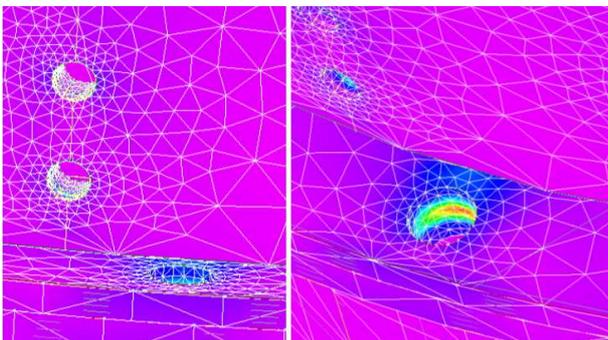


Figura 10: Máxima concentração de Tensão no cilindro com carregamento longitudinal.

A Tabela 1, a seguir, apresenta o carregamento limite aplicado no eixo longitudinal e transversal e as principais respostas da geometria em função dos carregamentos aplicados.

Tabela 1: Apresentação das principais respostas dos carregamentos aplicados ao Cilindro dos Experimentos

"Solid Stress"	Carregamento Longitudinal (20000 N)	Carregamento Transversal (9000 N)
Resposta (output) (MPa) Tração	--	476,1
Resposta (output) (MPa) Compressão	--	29,9
Resposta (output) (MPa) Tração	373,0	--
Resposta (output) (MPa) Compressão	23,6	--

## Discussão

Com base nas respostas obtidas (output) pelo Nastran e análise das Figuras, é possível observar uma concentração de tensão em determinadas localidades, esse fato é considerado aceitável devido ao material Alumínio não exceder a sua tensão de escoamento [7], mas a melhoria dos pontos onde ocorrem às concentrações de tensões é interessante, já que, esses pontos são limitantes para o projeto se tornando o "elo fraco" da concepção preliminar. Nas demais localidades as concentrações de tensões estão bem distribuídas, principalmente na Casca, onde nela é notada uma pequena deformação específica ( $\epsilon$ ) pelo fato da utilização do material compósito de laminado Carbono, possibilitando uma otimização da estrutura [11].

As furações e fixações, ponto de importância para manter a característica hermética do cilindro, onde nela as deformações não podem permitir a falha na capacidade de estanque, apresentam bons resultados e satisfatórios para o projeto, mas como mencionado anteriormente impõe uma limitação devido à alta concentração de tensão nesses locais.

Com essa análise é interessante observar uma possível otimização da geometria, caso exista interesse, diminuindo assim sua massa. Outro fator importante é a possibilidade de aumentar o número de furações para a fixação entre a Flange Inferior e a Base, dissolvendo as concentrações de tensões nesses pontos. Isso afirma que a geometria da estrutura do Cilindro de Experimentação está dentro das exigências do projeto, mas possibilitando melhorias para a concepção final [11].

## Conclusão

O trabalho apresentou informações referentes à análise estrutural estática da estrutura externa do Cilindro dos Experimentos, sendo parte integrante do MEXP, pelo método dos elementos finitos, utilizando o software FEMAP VisualNastran. Assim, com base nos resultados obtidos é possível expor que:

- A estrutura externa do Cilindro dos Experimentos sofre concentrações de tensões em determinadas localidades da geometria, mas essas concentrações de tensões não excedem a tensão de escoamento suportada pelo material.
- As deformações específicas ( $\epsilon$ ) são aceitáveis.
- Para uma análise preliminar a característica de hermeticidade aparenta ser atendida.
- É possível a realização da otimização da estrutura, caso exista interesse.
- A concepção da geometria é aceitável para a função exigida.
- O número de furações deverá ser aumentado, dissolvendo as concentrações de tensões nos locais apresentados.
- A possibilidade da substituição do material composto deverá ser estudada em virtude do custo / benefício e limitação do compósito em manter a hermeticidade do sistema.

Para uma análise preliminar da concepção da geometria o estudo se mostra satisfatório, apresentando que esta atende as exigências das especificações do projeto e alguns fatores que possam melhorar o Cilindro dos Experimentos.

## Referências

[1] ENG. ALFREDO OTTO BROCKMEYER - Especificação Técnica Estrutural do Módulo de Experimentação

[2] ZIENKIEWICZ, O. C. - The Finite Element Method (5th ed.) (3 vols.) (2000).

[3] HARRY G. SCHAEFFER – MSC/Nastran Primer Static and Normal Modes Analysis Schaeffer Analysis, Inc. (1979)

[4] LUIZ FERNANDO MARTHA - Método da Análise das Estruturas PUC-RIO

[5] OLIVIER A. BAUCHAU - Aerospace Structural Analysis - School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology (2002)

[6] Finite Element Method Programming With Mathematica - eBook PDF

[7] Especificações dos Materiais em: [www.matweb.com](http://www.matweb.com)

[8] TIMOTHY D. BURCHELL - Carbon Materials for Advanced Technologies

[9] IVAN RIVERA - Visual Nastran for Windows a Beginners Guide (2003)

[10] Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structure Military Handbook (1998)

[11] WILLIAM F. MCCOMES - Aerospace Structures Engineers - Structural Design