

ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DA GEOMETRIA DO CILINDRO DOS EXPERIMENTOS DO MÓDULO DE EXPERIMENTAÇÃO DO PROJETO SARA SUBORBITAL UTILIZANDO O MSC/NASTRAN

Artur C. Arantes Filho¹, Denis G. Vieira², Luis Eduardo V. Loures da Costa³

¹IAE - 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

²IAE - 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

³IAE - 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 Projeto SARA Suborbital consiste em um plataforma recuperável, destinada a realização de experimentos em ambiente de microgravidade (μg). O objeto desse trabalho é apresentar a análise estrutural de carregamento estático da concepção preliminar da geometria completa do Cilindro dos Experimentos, sendo parte integrante do Módulo de Experimentação do Projeto SARA Suborbital. O estudo utiliza o Método dos Elementos Finitos auxiliado pelo software FEMAP VisualNastran / Nastran, com o objetivo de apresentar 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: Engenharia

Introdução

A importância da capacitação no domínio da tecnologia espacial, que, em seu ciclo completo, abrange centros de lançamento, veículos lançadores, satélites e cargas úteis, decorre de sua relevância para o futuro do País. O objetivo principal é capacitar o Brasil a desenvolver e utilizar tecnologias espaciais na solução de problemas nacionais e em benefício da sociedade brasileira, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida, por meio da geração de riqueza e oferta de empregos, do aprimoramento científico, da ampliação da suficiência sobre o território e melhor percepção das condições ambientais. Buscando vencer os desafios tecnológicos que se apresentam na execução de grandes projetos, o Projeto SARA Suborbital (Satélite de Reentrada Atmosférica), Figura 1, se firma mediante a prática de ações de pesquisa e desenvolvimento, juntamente com os setores acadêmico e industrial. Além disso, o Projeto SARA Suborbital atua como forte indutor de inovação, fato que repercute diretamente na capacitação e na competitividade da indústria nacional, sob a forma de aquisição de competências e tecnologias estratégicas, de novas metodologias e processos de trabalho, à luz de normas de qualidade de padrão internacional.

O Projeto SARA Suborbital irá proporcionar a realização de inúmeros experimentos científicos e tecnológicos por universidades e centros de pesquisa brasileiros e,

também, a atenção de usuários estrangeiros interessados na utilização do ambiente de microgravidade, proporcionado pelos vãos, para suas pesquisas.

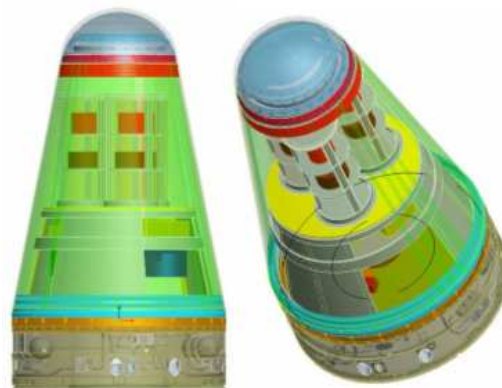


Figura 1: Plataforma SARA Suborbital

Esta plataforma SARA Suborbital vem a ser, na realidade, um passo no desenvolvimento de uma plataforma orbital com o mesmo nome: SARA. Esse passo consiste como meta intermediária, de maneira a permitir um alcance paulatino da tecnologia necessária para o SARA.

O Projeto SARA Suborbital está segmentado em subsistemas: Subsistema Estrutural; Subsistema de Redes Elétricas; Subsistema de Recuperação; e Módulo de Experimentação.

O Módulo de Experimentação (MEXP) em destaque na Figura 2, 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.

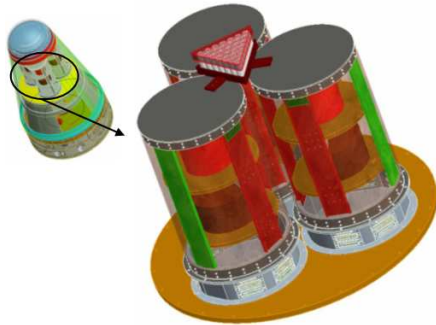


Figura 2: Módulo de Experimentação em destaque no SARA Suborbital

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 3, essa análise preliminar faz parte da sequência 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.

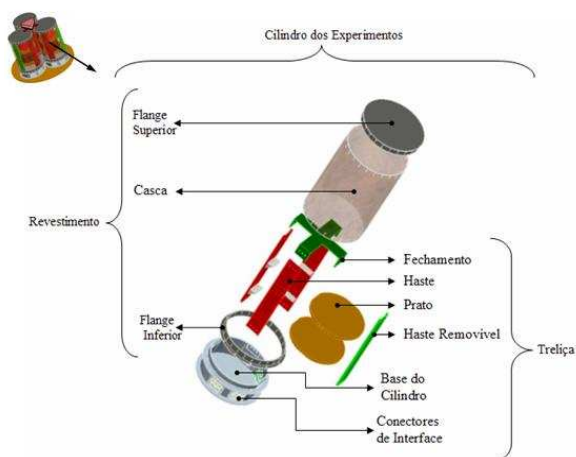


Figura 3: Cilindro dos Experimentos

Nessa primeira etapa de estudo onde o foco do trabalho é direcionado para o Cilindro dos Experimentos, consiste a análise estrutural através do Método dos Elementos Finitos [2] utilizando o software FEMAP v8.2.1 VisualNastran / NASTRAN (NASA STRUCTURAL ANALYSIS), 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; $\{F\} = [K].\{a\}$ - onde $\{F\}$ é o vetor de forças atuantes e reações, $[K]$ é a matriz global e $\{a\}$ é o vetor de deslocamentos dos nós [2] [3] [4].

Para esse caso, foi adotada a propriedade de elemento de sólido e malha Tetraedro ("Tetrahedral Mesh") [2] [5] [6], utilizando para as partes: Base; Flange Inferior e Flange Superior, Hastes e Fechamento o material Alumínio 7475-T651, onde a tensão de escoamento do material é 510 MPa e a tensão máxima admissível é 586 MPa [7], 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 [7][8], e para os pratos foi estudada a utilização do material Honeycomb [7], mas devido aos métodos de fabricação e função de fixação dos experimentos no prato, o material foi substituído por Alumínio 7475-T651 para uma análise preliminar. 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 [8].

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 estrutural, 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 sequência para a realização do estudo e modelamento pode ser observada na Figura 4 [9].

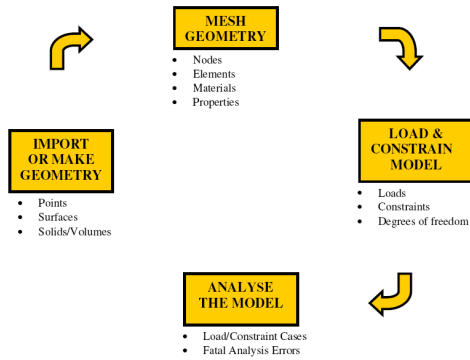


Figura 4: Seqüência de ações realizadas no FEMAP para a análise estrutural

Para a análise realizada no NASTRAN o Cilindro dos Experimentos é constituído por uma malha Tetraedro formado por 268267 nós e 899241 elementos, mantendo a atenção direcionada para uma malha refinada onde há interesse 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 e pontos onde seja possível realizar uma otimização da geometria do cilindro [10].

Assim com o modelamento da geometria, Figura 5, e as Condições de Contorno, Figura 6, foram inseridos carregamentos laterais na região da Casca e Haste, e carregamentos longitudinais nos pratos.

A utilização de uma malha detalhada (refinada) nos locais de furação e fixação tem o intuito de apresentar um ótimo resultado em referência as tensões de resposta oriundas das forças atuantes simuladas.

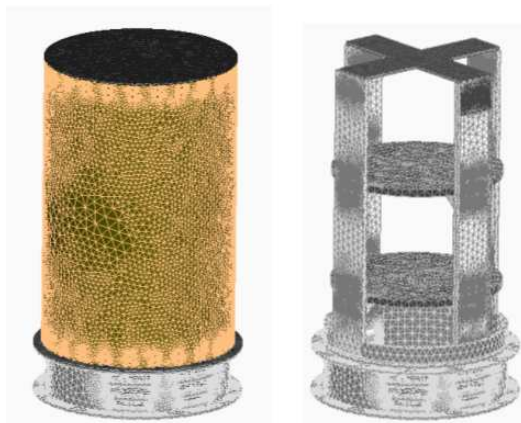


Figura 5: Cilindro dos Experimentos, com Malha Tetraedro.

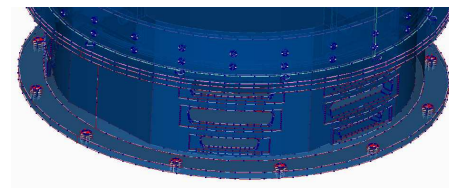


Figura 6: Base do Cilindro dos Experimentos, com as restrições

Os carregamentos longitudinais e laterais foram aplicados no cilindro com grandezas distintas e objetivando a identificação dos pontos propícios à ocorrência de colapso estrutural da concepção preliminar da geometria adotada [11]. A simulação tomou como base possíveis forças atuantes no transporte do MEXP integrado ao SARA, durante o lançamento, abertura do pára-quedas e reentrada do SARA Suborbital,

Assim o resultado com o carregamento lateral no cilindro foi obtido, podendo ser observado na Figura 7, contendo as concentrações de tensões e o deslocamento exagerado da estrutura.

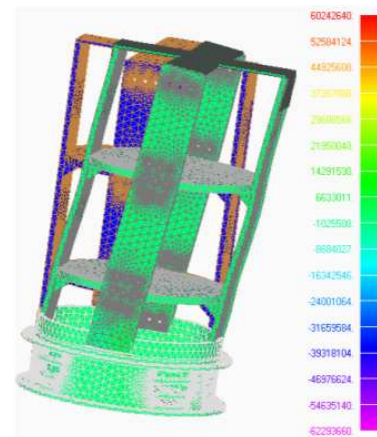


Figura 7: Cilindro dos Experimentos com carregamento Lateral

A Figura 8 apresenta a localidade da fixação da Haste com a Base, onde há máxima concentração de tensão no cilindro com aplicação do carregamento lateral.

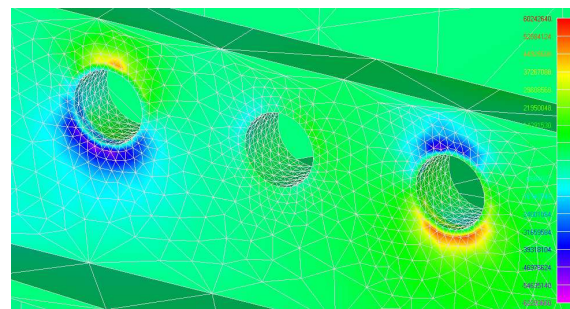


Figura 8: Máxima concentração de Tensão no cilindro com carregamento Lateral.

Aplicação do carregamento longitudinal, de tração e compressão, foi adotado a geometria devido as cargas impostas durante o lançamento e abertura do pára-quadras do SARA Suborbital. Deve-se atentar a ocorrência de possíveis pontos de concentrações de tensões de compressão e a possibilidade do material compósito sofrer delaminação [8][11] em decorrência da compressão.

O resultado obtido a partir da aplicação do carregamento longitudinal pode ser observado na Figura 9 e 10, contendo as concentrações de tensões e o deslocamento exagerado da estrutura.

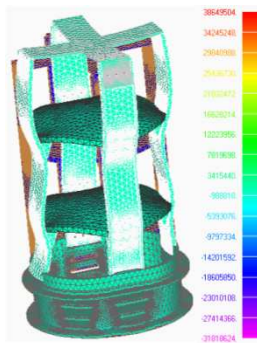


Figura 9: Cilindro dos Experimentos com carregamento limite longitudinal – Tração.

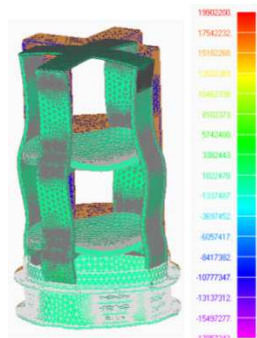


Figura 10: Cilindro dos Experimentos com carregamento limite longitudinal – Compressão.

A Figura 11 apresenta a localidade da fixação da Base, onde há máxima concentração de tensão no cilindro com aplicação do carregamento longitudinal.

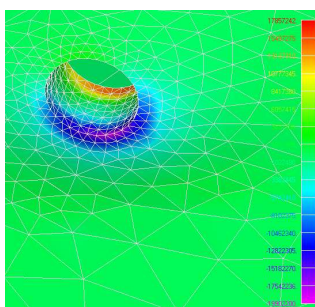


Figura 11: Máxima concentração de Tensão no cilindro com carregamento longitudinal.

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

Tensões de Abertura do Pára-quadras	Máximo (Pa)	Mínimo (Pa)
Stress	31818624	-31818624
Max Shear Stress	48736684	
Deformação Total: 3,40184E-5 m		
Tensões do Lançamento	Máximo (Pa)	Mínimo (Pa)
Stress	38649504	-31818624
Max Shear Stress	48736684	
Deformação Total: 3,40184E-5 m		
Tensão Lateral	Máximo (Pa)	Mínimo (Pa)
Stress	182215664	-1,5408E+8
Max Shear Stress	312009472	
Deformação Total: 5,92269E-4 m		

Discussão

Com base nas respostas obtidas (output) pelo NASTRAN e análise das Figuras apresentadas nos resultados, é possível observar em determinadas regiões do cilindro pontos com concentração de tensão. Esse fato é considerado aceitável para esse caso, já que, os materiais utilizados na concepção preliminar do Cilindro dos Experimentos não excedem as suas tensões de escoamento devido ao carregamento aplicado [7].

A melhoria da concepção nos locais onde ocorre às concentrações de tensões é interessante. Esses pontos são limitantes para o projeto se tornando o “elo fraco” da geometria adotada. Nas demais localidades as concentrações de tensões estão bem distribuídas, principalmente na Casca, onde nela é notada uma pequena deformação específica (ϵ) pelo fato da utilização do material compósito de laminado Carbono, possibilitando uma otimização da estrutura. O fato da substituição do compósito de Carbono pelo Alumínio poderá ser estudada, devido a limitação do compósito em conservar a característica hermética do sistema [11].

Os Pratos são importantes, devido ao fato de ser o ponto de alocação dos experimentos e assim, a escolha do material Alumínio 7475-T651 para os pratos tomou como base a fixação dos experimentos, substituindo o Honeycomb para uma análise preliminar. Com o material Alumínio o estudo foi direcionado aos pontos de furação, locais onde teriam a maior probabilidade de falha estrutural devido ao carregamento imposto pela aceleração no lançamento e desaceleração dos experimentos no momento de abertura dos pára-quadras. Com esses objetivos impostos e analisando os resultados, é possível observar que os pratos suportam o carregamento imposto pelo SARA Suborbital durante seu ciclo de vida, mas

uma otimização da estrutura seria interessante, como a eliminação dos apoios de fixação dos Pratos nas Hastes, se tornando uma única estrutura, diminuindo as furações e por consequência limitações do projeto onde ocorre concentração de tensão. Esse fato irá transferir os esforços impostos aos Pratos e suas furações (fixações) para as Hastes, tornando uma geometria mais confiável [10] [11].

A furação da Flange inferior e superior, 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 forma o pensamento de que uma melhora na concepção será necessária.

Com essa análise é interessante observar uma possível otimização da geometria, caso ocorra 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. As Hastes podem sofrer melhorias, adotando uma geometria cilíndrica (oca), diminuindo a probabilidade de sofrer Flambagem. Os Métodos de Fabricação e custo para a própria fabricação da geometria devem ser estudados, visando um melhor custo/benefício do Cilindro dos Experimentos.

Conclusão

O trabalho apresentou informações referentes à análise estrutural estática do Cilindro dos Experimentos, sendo parte integrante do MEXP, pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando o software NASTRAN. Assim, com base nos resultados obtidos é possível expor que:

- A estrutura de interface da Flange Inferior e Base 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 (ϵ) são aceitáveis
- É necessário o estudo do compósito Carbono, verificando se há a conservação da característica hermética do sistema, devido à espessura de 2mm da Casca.
- Para uma análise preliminar a característica de hermeticidade aparenta ser atendida.
- É possível a realização da otimização da estrutura, caso exista interesse.
- Os pontos de concentração de tensões nos Pratos devem ser eliminados, fazendo que a confiabilidade no sistema aumente. O

desenho de uma nova geometria para esse local é necessário.

- A concepção da geometria é aceitável para a função exigida.
- O número de furações deverá ser aumentado diminuindo às concentrações de tensões nos locais apresentados.
- Algumas furações estão rasas, necessitando de um novo desenho.
- A geometria deverá ser vinculada aos métodos de fabricação, verificando se a mesma atende as especificações e relacionar a concepção adotada com o custo de fabricação.

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
- [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