

Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Análise Numérica do Sistema de Ancoragem do Motor L75 via Método dos Elementos Finitos

Bolsista: Maria Fernanda de Souza Ferreira

Orientador(a): Daniel Fraga Sias

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2016 a Julho de 2017

Resumo

A etapa de iniciação científica determinada neste presente relatório final constitui em apresentar comparações dos resultados obtidos por meio de simulações numéricas da estrutura primária atual e da estrutura primária proposta para o Sistema de Ancoragem do Motor Foguete L75 utilizando o software comercial ANSYS Workbench v16.2. A resistência estrutural e modos de vibração obtidos irão fornecer informações à equipe de projeto a fim de avaliar se o novo *layout* da estrutura primária atende os requisitos de projeto fornecendo melhor desempenho estrutural, maior facilidade de integração com outros componentes, melhor transferência de carga e a relação entre as frequências naturais do Sistema de Ancoragem e outros componentes do motor.

1 Introdução

O Sistema de Ancoragem é uma estrutura mecânica responsável pela transmissão do empuxo gerado pelo Motor L75 ao veículo lançador. Além de ser projetado para permitir a fixação de componentes, proteger os equipamentos dos gases de exaustão da saída da tubeira por meio de escudo térmico, resistir as condições de manuseio e aos esforços solicitantes durante a operação do motor. A Figura 1 (a) mostra a versão atual do Motor L75 com a maioria dos equipamentos projetados e o Sistema de Ancoragem (003-100000/B2001), e a Figura 1 (b) o modelo mecânico completo do Sistema de Ancoragem (003-100000/B0005). Esta estrutura deverá atender aos requisitos especificados pelos documentos e pelos requisitos dimensionais, de massa, de carregamentos estáticos e dinâmicos, entre outros.

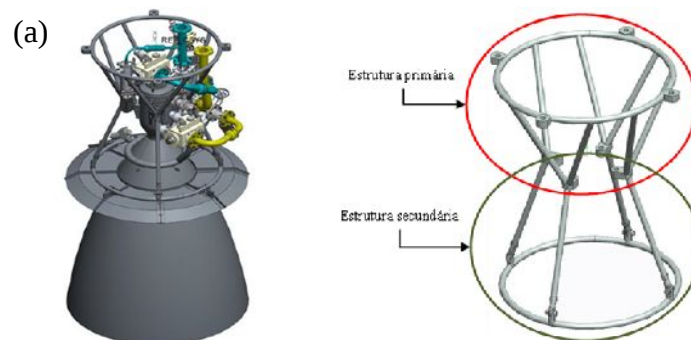


Figura 1: (a) Sistema de Ancoragem do Motor L75. (b) Modelo Mecânico atual.

Em fases iniciais do projeto, alguns componentes que compõe o motor não foram fabricados para realizar ensaios funcionais e de desempenho integrados ao Sistema de Ancoragem. Portanto, é necessário viabilizar a realização de ensaios de carregamentos estáticos e dinâmicos do Sistema de Ancoragem por meio de simulação computacional que permitirá a realimentação do modelo FEM a partir dos resultados do ensaio estático e verificação de projeto do Sistema de Ancoragem para realização de novos ensaios de desenvolvimento do Modelo de Desenvolvimento (DM), além de orientar para o projeto do Modelo de Engenharia (EM) e do Modelo de Qualificação (QM) do Sistema de Ancoragem nas próximas fases do planejamento do motor.

O objetivo principal desta análise é viabilizar a melhoria do projeto mecânico do Sistema de Ancoragem visando:

- a) Minimizar os momentos fletores na interface com a Câmara de Empuxo do Motor L75;
- b) Melhorar a transmissão das cargas de empuxo através dos tirantes, com a proposta de diminuir as tensões geradas pelos esforços solicitantes e os

deslocamentos resultantes;

- c) Minimizar as flexões verificadas no projeto atual na interface com o veículo lançador.

No contexto da realização de ensaios, simulações numéricas confiáveis se mostram fortes aliadas na redução de custos de projetos auxiliando o projetista ainda na fase de concepção. O Sistema de Ancoragem faz parte do projeto Motor L75 que está sendo projetado pela equipe de especialistas da Divisão de Propulsão Espacial (APE) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). O principal foco é saber se o Sistema de Ancoragem será capaz de resistir aos esforços solicitantes gerados durante a operação do Motor L75 sob certas condições e realizar a comparação com os resultados do ensaio real.

2 Material e métodos

As propriedades termofísicas do material (SAE 1035) foram obtidas a partir do laudo técnico do fornecedor do material e a curva do comportamento plástico foi estimada utilizando a formulação matemática apresentada por Rasmussen (2001). Estas informações também foram utilizadas no documento “Memorial de Cálculo da Estrutura Primária do Sistema de Ancoragem – Versão Etanol(003-100000/B0005)” e introduzidos num *Data Bank* de materiais na APE para utilização em futuras análises. As propriedades do material SAE 1035 utilizado para a fabricação da estrutura do Sistema de Ancoragem estão apresentadas na

Erro! Fonte de referência não encontrada..

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as curvas plásticas para dois níveis de encruamento adotadas para as simulações numéricas. Como não foram observadas diferenças significativas com cada uma das curvas neste relatório é apresentado apenas os resultados considerando alto encruamento.

Tabela 1: Propriedades do SAE 1035.

Descrição	Variação	Valor
Módulo de Young	E	200 Gpa
Tensão de Escoamento	σ_{adm}	235 Mpa
Tensão de Ruptura	σ_{rup}	340 Mpa
Densidade	ρ	7830 Kg/m ³
Coeficiente de Poisson	ν	0,28

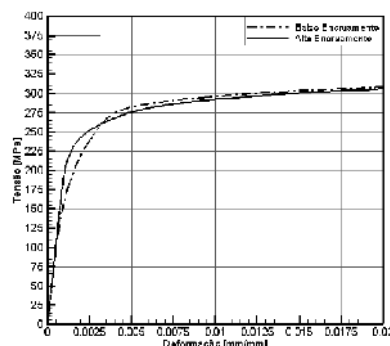


Figura 2: Curva Tensão x Deformação estimada para o SAE 1035

2.1 Modelo geométrico

Para realizar o estudo foi considerada a estrutura primária do Sistema de Ancoragem do modelo atual e do modelo proposto, pois só esta estrutura é aquela que tem a função de resistir aos esforços solicitantes impostos pela Câmara de empuxo devido ao empuxo gerado. Os modelos CAD utilizados nas análises de elementos finitos são apresentados na Figura 3.

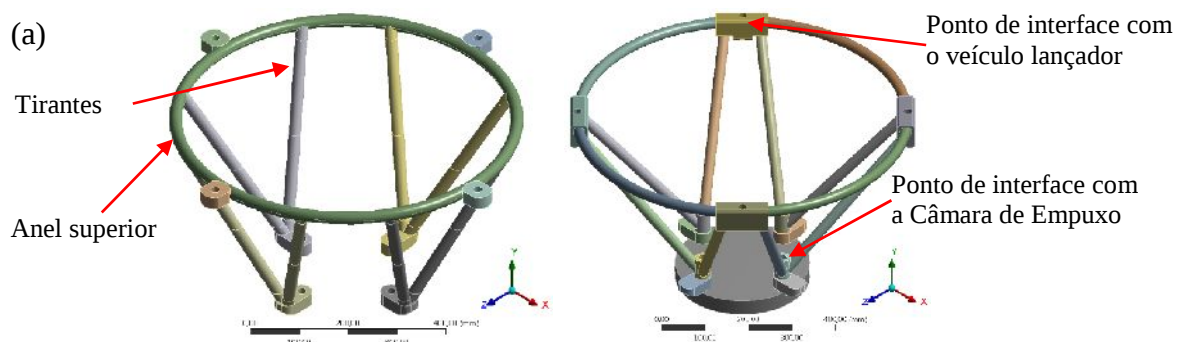


Figura 3: Modelo CAD utilizado na análise. a) modelo atual. b) modelo proposto.

2.2 Malha de Elementos Finitos (MEF)

Para realizar as análises de elementos finitos do Sistema de Ancoragem foi gerada uma malha buscando elementos regulares com espaçamento uniforme sobre os tirantes. Para a obtenção de uma malha adequada para as análises estruturais e modais, simultaneamente foi criado um grupo de parâmetros para determinar o tamanho dos elementos. Foi realizado refinamento localizado na região que faz a interface com o veículo lançador e câmara de empuxo, a fim de obter uma malha de elementos finitos menores e mais regulares permitindo maior precisão dos resultados em deslocamento, em especial para o regime plástico. Além disso, foi realizado um estudo de independência de malha qual se avaliou 4 valores diferentes para o número de elementos por comprimento de onda ($EPW = 4, 6, 8$ e 10). Desta avaliação verificou-se que a partir de 8 elementos por comprimentos de onda os resultados não são mais alterados significativamente. A Tabela 2 apresenta os dados utilizados para obtenção dos resultados das análises, as quais consideram 8 elementos por comprimentos de ondas (EPW) garantindo a boa representação de frequências até 7000 Hz conforme a equação abaixo:

$$Esize = \frac{C_0}{F_{max} * EPW} = 0,105 \text{ m}$$

Tabela 2: Dados iniciais para o cálculo do tamanho máximo dos elementos finitos.

Parâmetros	Valores
------------	---------

Velocidade de propagação do som (C_0)	6000 m/s
Elementos por comprimento de onda (EPW)	8
Frequência máxima (F_{max})	7000 Hz

A parametrização citada foi implementada no software ANSYS Workbench v16.2 e a Figura 4 apresenta a janela de parâmetros onde se verificam os valores apresentados na Tabela 2 e os valores obtidos para o tamanho dos elementos (Esize).

Na Figura 4 o parâmetro P8 determina o tamanho dos elementos da malha e calculado a partir do parâmetro P6. A Figura 5 apresenta a janela de estudo parametrizado implementado no ANSYS.

Outline of All Parameters				
	A	E	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Modal (Q1)			
4	P8	Mesh Element Size	0,11565	m
5	P2	Length	0,4226	
6	P3	n_index	1	
7	P4	epw	8	
8	P5	soundSpeed	6000	
9	P6	max_freq	7058,5	
10	P7	esize	0,11565	
*	New input parameter	New name	New expression	
12	Output Parameters			
14	Charts			

Figura 4: Janela de parametrização da malha de elementos finitos.

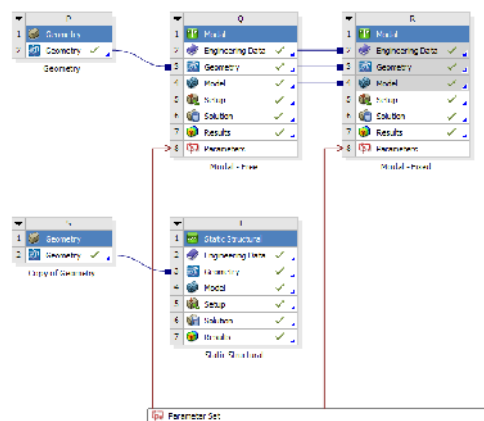


Figura 5: Janela de estudo de elementos finitos do ANSYS Workbench.

Observa-se na Figura 5 que as análises Q e R são definidas pelos parâmetros calculados. A Figura 6 apresenta a malha de elementos finitos gerada para os estudos modais e estruturais.

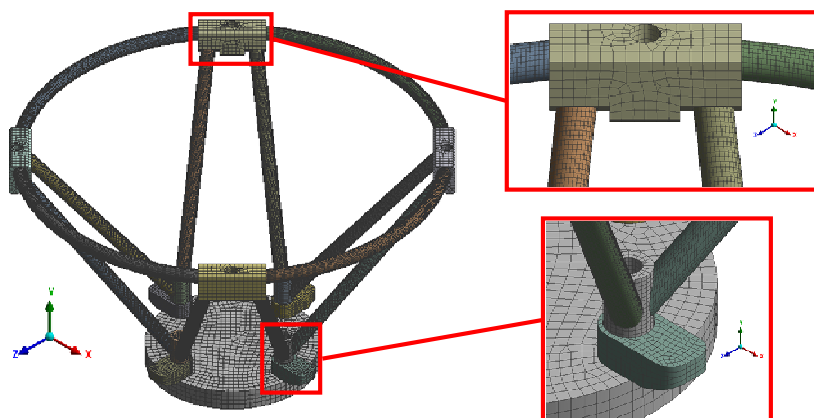


Figura 6: Malha de Elementos Finitos do Sistema primário do sistema de ancoragem.

Pode-se observar que a malha gerada para os tirantes apresenta estrutura regular com elementos distribuídos uniformemente. Em destaque ainda é apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**6 a malha de elementos finitos gerada para o dispositivo de teste na qual foi garantida a presença de pelo menos 3 elementos na secção transversal para melhor convergência dos resultados em deslocamento. As condições de contorno adotadas foram de deslizamento nos planos de simetria e fixação no topo do Adaptador P8 (999-92-18-4001-0-1_adap_p8), como apresenta na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4. A malha de elementos finitos utilizada no modelo contou com 363.264 nós e 615.088 elementos, composta por elementos tet10, wed15, pyr13e hexa20.

3 Análise de Elementos Finitos

De acordo com os planejamentos de análise (003-100000/B0003 e 003-100000/B0004) estudos modais e estruturais do sistema primário do Sistema de Ancoragem na condição livre (Cenário 1) e na condição de fixação pelo suporte superior (Cenário 2) são necessários para o desenvolvimento e aperfeiçoamento do produto final. Desconsiderando o sistema secundário como representa na Figura 7 a análise modal visa verificar a influência nas frequências naturais devido à condição de contorno da fixação do dispositivo e estrutural tem o objetivo de verificar a resistência e caminho de carga da estrutura.

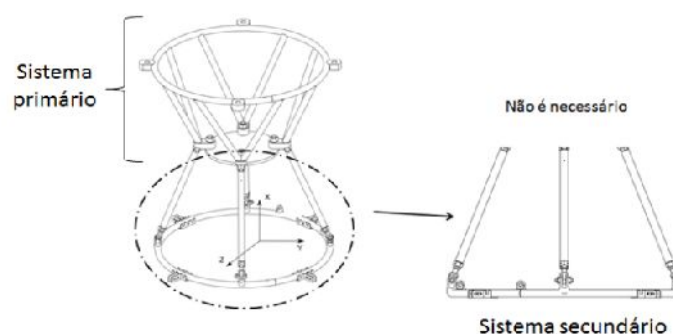


Figura 7: Sistema de Ancoragem sem o sistema secundário.

4 Resultados e Comparações

Os resultados que são apresentados abaixo foram obtidos para a estrutura principal do Sistema de Ancoragem apresentada na Figura 13. As primeiras análises foram realizadas para levantar as frequências naturais do modelo de desenvolvimento (DM) do Sistema de Ancoragem do Motor L75. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados do modelo numérico do referente ao relatório parcial. Dando sequência às análises

de elementos finitos, foram realizadas simulações estruturais estáticas considerando a carga de 80kN em ambos os modelos. Os resultados de ambas as análises citadas são apresentados a seguir:

4.1 Análise Modal

4.1.1 Condição Livre

Análises de frequências naturais correspondem à análise modal a qual não são impostas condições de contorno externas, portanto, a estrutura mecânica está em uma condição totalmente livre sem qualquer tipo de fixação ou interface com qualquer outra estrutura. Na

Tabela 33 a seguir apresenta a comparação das frequências naturais da estrutura primária do Sistema de Ancoragem atual com aquele que é objeto de proposta de modificação.

Tabela 3: Frequências naturais da Estrutura do Sistema de Ancoragem.

Frequências Naturais da Estrutura Primária Atual				Frequências Naturais da Estrutura Primária Proposta			
Modo	Frequência (Hz)	Modo	Frequência (Hz)	Modo	Frequência (Hz)	Modo	Frequência (Hz)
1	0	7	42,41	1	0,	7	59,126
2	0	8	45,068	2	9,3633e-004	8	71,412
3	8,3536e-004	9	46,107	3	1,6703e-003	9	73,02
4	1,1402	10	55,01	4	0,29297	10	75,528
5	1,9764	11	55,014	5	0,30024	11	86,113
6	2,0248	12	110,28	6	0,32787	12	86,114

As figuras abaixo apresentam os modos de vibração 9, 11, 12.

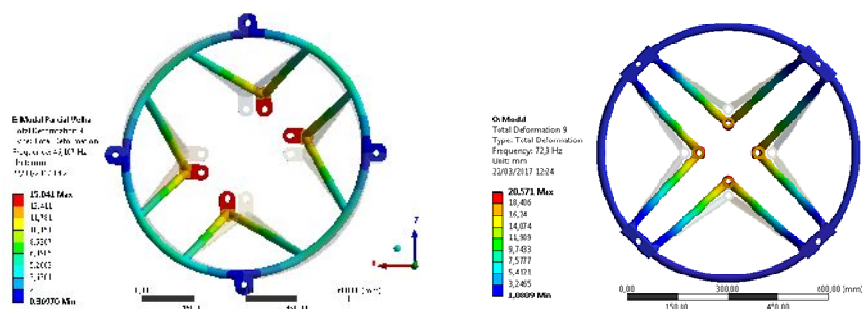


Figura 8: Modo de vibração 9 da estrutura primária. (a) Atual. (b) Proposta.

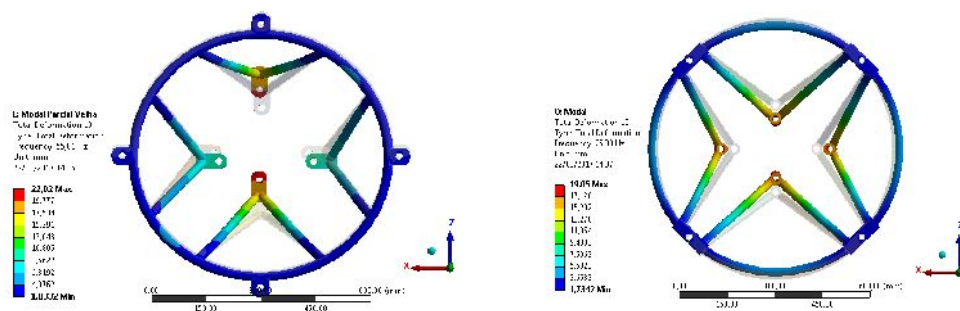


Figura 9: Modo de vibração 11da estrutura primária. (a) Atual. (b) Proposta.

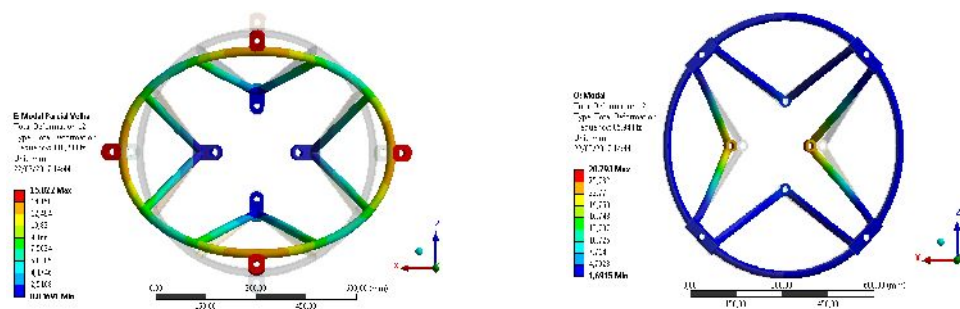


Figura 10: Modo de vibração 12da estrutura primária. (a) Atual. (b) Proposta.

4.1.2 Com fixação pelo Suporte Superior

A análise modal apresentada nesta secção visa quantificar a influência da fixação do Sistema de Ancoragem quando fixado somente pela interface superior verificando as frequências naturais. Na Tabela 4 são apresentadas as 12 primeiras frequências obtidas para comparação da estrutura primária atual e da estrutura primária proposta do Sistema de Ancoragem.

Tabela 4: Frequências naturais da Estrutura primária do Sistema de Ancoragem quando fixado pelo suporte superior.

Frequências Naturais da Estrutura Primária Atual				Frequências Naturais da Estrutura Primária Proposta			
Modo	Frequência (Hz)	Modo	Frequência (Hz)	Modo	Frequência (Hz)	Modo	Frequência (Hz)
1	53,714	7	182,52	1	96,608	7	466,73
2	57,26	8	282,1	2	96,619	8	467,74
3	57,272	9	298,95	3	96,62	9	524,11
4	60,602	10	396,99	4	96,632	10	524,11
5	143,41	11	397,15	5	465,72	11	524,11
6	182,31	12	421,75	6	466,73	12	524,18

Na Figura 11 apresenta o modo de vibração 10 com fixação do Sistema de Ancoragem quando fixado suporte superior do Sistema de Ancoragem da estrutura primária atual e proposta.

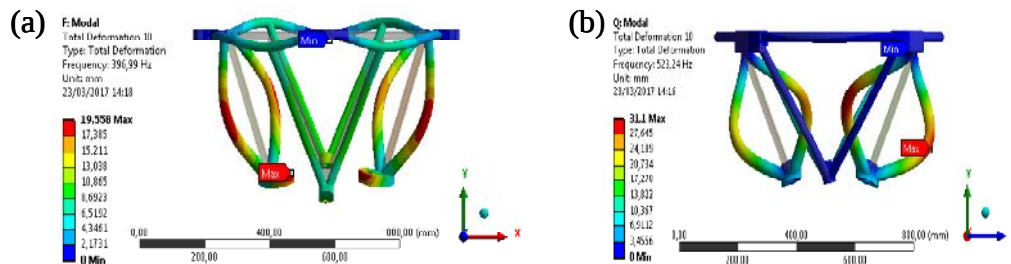


Figura 11: Modo de vibração 10 com fixação. (a) Atual. (b) Proposta.

4.2 Análise Estrutural Estática

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta uma comparação visual entre os deslocamentos obtidos numericamente e experimentalmente conforme relatório 003-100000/E0001. Observa-se que os braços da estrutura mecânica sofreram flexão devido a carga de 80kN aplicada pelo pistão hidráulico.

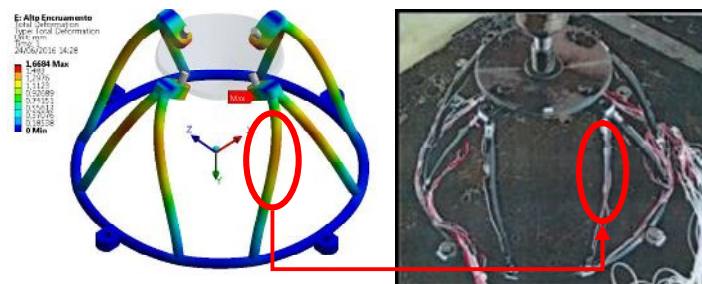


Figura 112: Sistema de Ancoragem em condição de Ensaio.

Com os resultados demonstrados anteriormente, foi realizado uma análise numérica estrutural com as mesmas condições de contorno do novo design do Sistema de Ancoragem proposto, onde podemos observa os que os braços da estrutura mecânica sofreram uma pequena flexão quase não considerável, e não houve grandes deformações. Isto resultou, em relação a mudança de posição dos tirantes e dos pontos de fixação, em uma estrutura mais rígida, reduzindo os esforços devido aos momentos gerados pelo carregamento devido à força empuxo. Desta forma a estrutura treliçada proposta apresenta esforços axiais melhores e otimizados nos pontos de interfaceado que a estrutura anterior, como apresenta na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

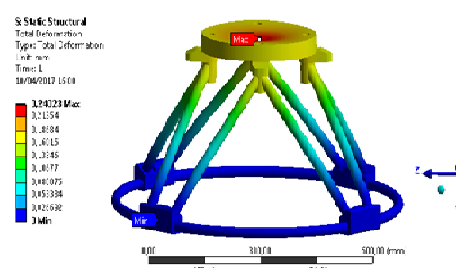


Figura 123: Estrutura proposta para o Sistema de Ancoragem.

5 Conclusões

A partir dos resultados apresentados pelas análises modais e estruturais pode-se concluir que a estrutura primária do Sistema de Ancoragem projetada inicialmente de fato, não é o melhor *desing*, pois apresentou baixas frequências naturais e deslocamentos acentuados quando realizado o ensaio de carregamento estático, além dos momentos fletores e tensões indesejadas. O *design* para a estrutura primária proposta apresentou frequências naturais mais elevadas, o que favorece a não superposição de frequências com outros componentes do Motor L75, como turbobomba, válvulas, câmara de combustão e gerador de gás. Além disso, quando realizada a análise numérica considerando o carregamento estático de 80kN, não foram observados na nova proposta de projeto os deslocamentos verificados no modelo atual. Os momentos fletores gerados no ponto de contato entre o dispositivo de teste (placa) e a estrutura primária foram desprezíveis. Outro fato observado foi que o novo *design* teve um aumento de massa de 3,3 kg comparado com o anterior. Este aumento ainda permite o cumprimento do requisito de projeto relacionado a massa total que deve ser menor ou igual a 35kg. Portanto, pode-se concluir desta forma que o desempenho estrutural e modal da nova proposta de projeto foi muito superior ao modelo atual.

Referências

Rasmussen, K. JR. **Full-range Stress-Strain Curves for Stainless Steel Alloys**. Research Report N°R811, Department of Civil Engineering – Centre for Advanced Structural Engineering, 2001.

BRASIL, Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, Instituto de Aeronáutica e Espaço **Fastening System Specification – Ethanol Version**. São José dos Campos, 2013 (003-100000/B2001).

_____:2014. **L75 Engine Specification – Ethanol Version**. São José dos Campos, (003-000000/B2006).

_____:2015. **Planejamento de Solicitação de Análise Dinâmica Estrutural do Sistema de Ancoragem do Motor L75 - Versão Etanol**. São José dos Campos, (003-100000/B0003).

_____:2015. **Planejamento de Análise Estática Estrutural do Sistema de Ancoragem do Motor L75 - Versão Etanol**. São José dos Campos, (003-100000/B0004).

_____:2016. **Memorial de Cálculo da Estrutura Primária do Sistema de Ancoragem – Versão Etanol**. São José dos Campos, (003-100000/B0005).

_____:2016. **Análise Estrutural Dinâmica do Sistema de Ancoragem do Motor-Foguete L75**. São José dos Campos, (003-000000/E1001).



_____:2016.**Resultado do Ensaio Estrutural Estático do Sistema de Ancoragem DM do Motor L75.** São José dos Campos, (003-000000/E1001).

_____:2017.**Análise Numérica do Sistema de Ancoragem do Motor L75 via MEF.** São José dos Campos, (MMOTEC 018/APE/2017; 003-100000/B0006).

Rao, S. S., **Vibrações mecânicas**, São Paulo-SP, Pearson Prentice Hall, 2008.

Wijker, J. **Mechanical Vibrations in Spacecraft Design.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2004.

Ansys®Mechanical Workbench v16.2