



ANÁLISE DINÂMICA VIBRATÓRIA DO CUBESAT MAUÁ

Luiz Vitor Manzoli Lopes

Pedro Castilho Martinez

Victor Casulli de Oliveira

Luiz Felipe Marchetti do Couto

luiz.vitor.manzoli@gmail.com

pedro.castilho.martinez@gmail.com

victorcasulli@gmail.com

luiz.couto@maua.br

Instituto Mauá de Tecnologia

Praça Mauá, 1, 09580-900, São Paulo, São Caetano do Sul, Brazil

Resumo. *Cubesat é um nanossatélite com aplicação em pesquisas acadêmicas, logo, apresenta um menor custo de produção em relação a um satélite comum. Por conseguinte, o presente trabalho abordará a verificação estrutural do nanossatélite CubeSat Mauá, idealizado pelo Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), cujo propósito será o lançamento desse na Estação Espacial Internacional (ISS), atendendo aos requisitos da Cal Poly Cubesat Design Specification (CDS). Utilizando o software estrutural ANSYS, cujos cálculos baseiam-se no método dos elementos finitos (MEF), verificar-se-ão as análises dinâmicas vibratórias referentes aos modos de vibração e a sua vibro-acústica. Sendo assim, estas verificações serão importantes na evolução do projeto de forma a garantir a proteção das peças internas e a integridade do nanossatélite, evitando patologias, colapso estrutural e o mau funcionamento dos componentes (painéis solares, placas de circuitos integrados, roda de giração, antenas, entre outros).*

Palavras-chave: *Cubesat, Nanossatélite, Dinâmica, Vibração, ANSYS*

1 INTRODUÇÃO

Satélites são objetos que percorrem uma trajetória circular ou elíptica em torno de um corpo celeste. Em astronomia, os satélites são classificados como naturais (Lua) ou artificiais (engenho criado pelo homem) (FLORENZANO, 2008). Atualmente, a busca por novas tecnologias e soluções para facilitar o posicionamento orbital e operação destes satélites artificiais com o menor custo possível vem sendo cada vez mais cobijado por engenheiros da área (aeroespaciais, mecânicos, civis, elétricos, computação, entre outros).

Os satélites artificiais permanecem em sua órbita conforme a massa e aceleração da gravidade da Terra, além da velocidade em que se este satélite se desloca no espaço. Por exemplo, um satélite artificial a 800 km de altitude do solo terrestre deve se deslocar em uma velocidade de 26000 km/h (FLORENZANO, 2008).

No final da década de 90, foi criado um design de referência de um nanossatélite que seria capaz de realizar tarefas simples, porém eficazes. Chamados de CubeSat, esse nanossatélite permite as universidades realizarem estudos aeroespaciais com um baixo custo, desde o correto funcionamento de seus componentes até a análise estrutural durante o seu transporte.

O posicionamento deste nanossatélite em órbita é feito por meio de um veículo lançador. Neste transporte, o satélite estará sujeito a esforços estáticos (acelerações quase estáticas) e dinâmicos (vibrações e impactos) (CIHAN et al, 2014). Desta forma, este trabalho tem como objetivo a análise dinâmica vibratória do nanossatélite CubeSat Mauá, por meio do software ANSYS, afim de validar sua estrutura para futuros lançamentos a serem realizados da Estação Espacial Internacional (ISS) ou por meio de um módulo espacial.

2 HISTÓRICO

2.1 Evolução nas análises estruturais

Com o avanço da tecnologia, a formalização da engenharia estrutural permite aos engenheiros dimensionar estruturas que possam receber um determinado carregamento com segurança, além de materiais compatíveis com a solução e redução de custos com análise da geometria, sem que estes possam prejudicar o bom funcionamento da estrutura, além dos componentes em que nela estão inseridos. (MARTHA, 2010).

Próximo à década de 50, a análise de estruturas complexas ou estruturas sujeitas a carregamentos complexos era um procedimento longo e árduo. A análise de uma grande obra com muitas ligações de barras, treliças espaciais, vigas e pilares poderia levar meses de cálculo com uma boa equipe de engenheiros estruturais. Devido a esse fato, várias suposições eram presentes no projeto para agilizar o processo, aumentando a imprecisão da estrutura final com possíveis superdimensionamentos (LEET; UANG; GILBERT, 2009).

Nos dias atuais, existem vários softwares que agilizam o processo do dimensionamento de estruturas, reduzindo meses para poucas horas de trabalho, obtendo os resultados finais com mais segurança e precisão, além da economia gerada pela redução do superdimensionamento (LEET; UANG; GILBERT, 2009).

No presente trabalho será utilizado o ANSYS, um software de engenharia assistido por computador o qual abrange uma variedade de disciplinas, incluindo análise estrutural, mecânica dos fluidos, transferência de calor entre outras.

2.2 Cubesat

No final da década de 90, os professores *Jordi Puig-Suari* e *Bob Twiggs* criaram o design de referência de um nanossatélite com a ideia de permitir um incentivo as Universidades e promover o estudo e a exploração espacial. Semelhantes às da primeira nave espacial Sputnik, porém, podendo diminuir o custo e tempo que seria gasto num satélite convencional, em virtude do material utilizado ser de comercialização convencional (*commercial off-the-shelf* – COTS), este satélite fora chamado de CubeSat (*Cube-Satellite*) (COSTA; FARIA; MAZI, 2015).

O CubeSat é um nanossatélite que em sua estrutura se encontram materiais leves, componentes eletrônicos e mecânicos, vínculos e parafusos. Os esforços aplicados ao nanossatélite podem aparecer em diferentes formas: Acelerações súbitas que podem alcançar 5 vezes a aceleração da gravidade (5g), vibrações devido às ondas de pressão, impactos, ruídos com nível acústico que podem chegar à 130 dB, além das condições de atmosfera e temperatura onde o CubeSat se encontra quando acionadas as fases do veículo lançador (CIHAN et al, 2014). Desta forma, a análise dinâmica vibratória vem a ter uma grande importância no desenvolvimento da estrutura que protegerá as peças internas e a integridade do nanossatélite, evitando patologias, mal funcionamento dos componentes ou um colapso estrutural.

3 FORMULAÇÃO TEÓRICA

3.1 Mecânica

A mecânica é o ramo das ciências que estuda os corpos, sejam estes em movimento ou em repouso, sob ações de forças (tais como impactos, vibrações, estática, ruídos, entre outros). Esta, por sua vez, pode ser subdividida em mecânica dos corpos rígidos, deformáveis ou dos fluídos (HIBBELER, 2005). No presente trabalho, será tratada a análise de corpos deformáveis, uma vez que haverá o cálculo de tensões e deformações por meio de uma análise estática e dinâmica.

3.2 Ações

Os carregamentos presentes em uma estrutura podem ser na forma estática ou dinâmica, ambos na forma determinística ou aleatória (Fig.1). Os carregamentos estáticos são aqueles que são aplicados gradualmente ou subitamente (sem impacto) na estrutura e não sofrem modificações ao longo do tempo. Os carregamentos dinâmicos são aqueles que apresentam variações ao longo do tempo, seja em intensidade, direção, sentido ou posição (CLOUGH, PENZIEN, 1995).

As ações determinísticas são aquelas onde é possível conhecer seu comportamento. As aleatórias são aquelas que não podem ser previstas com exatidão, sendo necessária uma abordagem estatística para estudar o fenômeno (CLOUGH, PENZIEN, 1995).

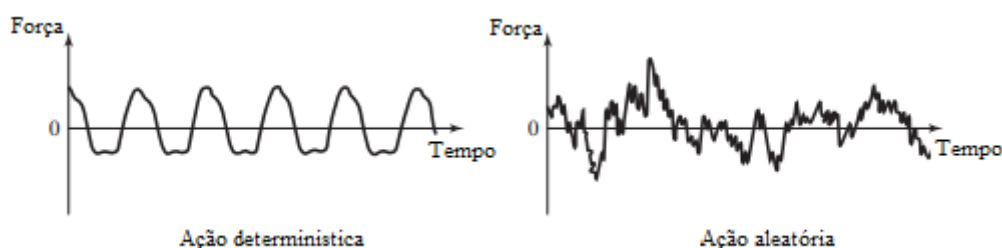


Figura 1 – Comportamento de ações determinísticas e aleatórias (RAO,2011)

3.3 Vibrações

Vibração é um fenômeno que ocorre quando um objeto possui um movimento repetitivo em um intervalo de tempo, assim sendo, a teoria de vibrações trata do estudo destes movimentos oscilatórios e das forças associadas a eles (RAO, 2011).

A maioria das atividades humanas possuem algum tipo de vibração. Quando uma pessoa anda por uma passarela, esta está gerando esforços de vibração a cada passo, solicitando a estrutura. Ao assistir um jogo de futebol em um estádio, os torcedores podem começar a pular em um ritmo harmônico, podendo fazer a estrutura vibrar (RAO, 2011).

3.4 Sistema massa-mola e os modos de vibração

Um sistema vibratório pode ser caracterizado pelo sistema massa-mola (Fig.2). Esse sistema possui um meio para armazenar a energia cinética e energia potencial (massa e mola), além de um meio de perda gradual da energia de vibração (amortecedor) (MIT OPENCOURSEWARE, 2011).

Um sistema massa-mola pode ser considerado não amortecido ou amortecido. Dizemos que o sistema é não amortecido quando não existe uma perda gradual da energia de vibração. Em contrapartida, um sistema amortecido possui essa perda de energia devido à uma ação externa (MIT OPENCOURSEWARE, 2011).

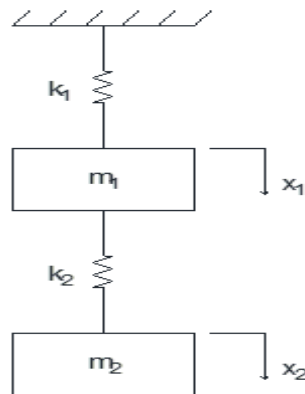


Figura 2 – Sistema massa-mola não amortecido (Os Autores)

Todo sistema vibratório possui frequências naturais e formas modais, ditando os modos de vibração. Pode-se dizer que um sistema está vibrando em um de seus modos naturais se,

após uma determinada perturbação, este sistema continuar vibrando sem a ação de forças externas. A determinação dos modos de vibração (formas modais e suas respectivas frequências naturais) ocorre com a determinação de autovalores e autovetores de um sistema com vários graus de liberdade (número mínimo de coordenadas necessárias para determinar a posição de um sistema) e igualando o determinante característico do sistema a zero (Eq.1). Vale lembrar que para n graus de liberdade, existem n modos de vibração (RAO, 2011).

$$\det[-[m] \omega^2 + [k]] = 0 \quad (1)$$

Onde:

m = massa do sistema

ω = Frequência aplicada ao sistema

k = Rigidez do sistema

3.5 Vibração excitada harmonicamente

Quando um sistema está sujeito a uma ação que apresenta periodicidade, pode-se dizer que este sistema está sendo excitado harmonicamente. As forças harmônicas podem ser representadas por meio de uma função harmônica, onde é aplicada uma magnitude A e a frequência ω de sua aplicação (Eq.3). Essa função é igualada a equação do movimento de um sistema vibratório (Eq.2) (MIT OPENCOURSEWARE, 2011).

$$\mathbf{F} = [m]\ddot{\mathbf{x}} + [c]\dot{\mathbf{x}} + [k]\mathbf{x} \quad (2)$$

Onde $\mathbf{F}$ pode ser representado por:

$$\mathbf{F} = A\sin(\omega t) \text{ ou } A\cos(\omega t) \quad (3)$$

Quando a frequência aplicada à força é próxima ou se igual à frequência natural da estrutura, pode-se dizer que está ocorrendo o fenômeno do batimento ou da ressonância. Neste caso, os deslocamentos são máximos, podendo haver as maiores tensões e, por conseguinte, o colapso da estrutura (MIT OPENCOURSEWARE, 2011).

3.6 Vibrações randômicas

Vibrações randômicas são ações não determinísticas, sendo necessária uma análise estatística para o estudo do fenômeno (Fig.3). Este tipo de vibração é o mais comum para situações que envolvam fenômenos naturais, como por exemplo terremotos, influência de ondas sob estruturas, ou mesmo ações de torcedores sobre uma arquibancada em dias de jogo. Como movimentos randômicos estão passíveis de possuírem ruídos brancos, as excitações devem ser tratadas com métodos estatísticos, isto é, a probabilidade de ocorrência de uma excitação na estrutura pode ser descrita utilizando os conceitos de média, variância, autocorrelação e a curva de Gauss para as aproximações dos resultados (BROWN, HWANG, 1997).

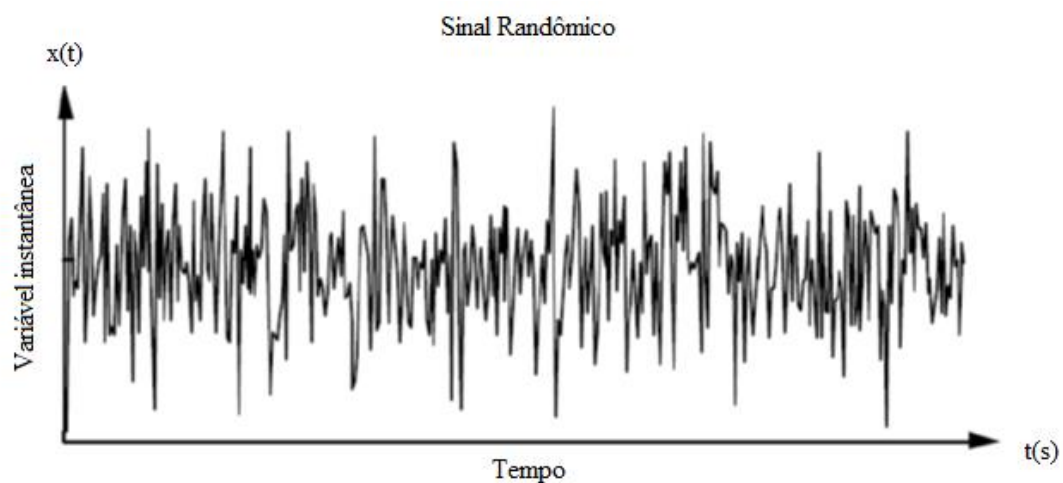


Figura 3 – Gráfico de um típico sinal randômico (FAGERUDD, 2014)

Por causa da aleatoriedade do fenômeno, as ondas deverão ser aproximadas para ondas estacionárias, ou seja, se duas ondas idênticas colidirem em sentidos opostos, o resultado seria a anulação das mesmas. Outra consideração que deverá ser feita, é considerar que o sistema se baseia na teoria Ergódica, desta forma, a média temporal é igual a média estatística, tornando as variáveis não dependentes do tempo, gerando um sistema estacionário estocástico. (BROWN, HWANG, 1997).

Para analisar o movimento, será necessário a utilização da curva normal, ou curva Gaussiana, para determinar a distribuição de probabilidade de ocorrer os fenômenos descritos. Como no caso de vibrações randômicas é sabido que existem picos descontínuos e aleatórios

numa função, será considerado o valor de significância de 0,27%, ou 99,73% de probabilidade de respeitar o espectro da função aleatória (BROWN, HWANG, 1997).

Com o auxílio do software ANSYS, é possível realizar a análise randômica do tipo Densidade Espectral, ou também chamada de espectro de densidade de energia (PSD), que se caracteriza por uma função de frequência, real e positiva, que, a partir da área formada pela mesma, é capaz de representar o quanto de energia uma determinada função estocástica é capaz de contribuir para o movimento randômico. Transportando para a análise do CubeSat, as frequências utilizadas nas funções do PSD podem se correlacionar com os modos de vibração que a peça possui, podendo analisar a contribuição energética desta variável na estrutura do nanossatélite

4 METODOLOGIA

4.1 Requisitos mecânicos de lançamento

As análises nas quais um satélite é submetido levam anos de preparação. É crucial uma estrutura que possua uma margem de segurança para atender aos carregamentos nos ambientes mais difíceis, desde o transporte por meio do foguete até seu retorno à Terra.

Devido a esse fato, grandes corporações espaciais (NASA, ESA, UK SPACE entre outras) desenvolveram seus próprios requisitos de lançamentos para qualquer veículo espacial.

Dimensões.

As dimensões estruturais do CubeSat modelo U devem respeitar os requisitos fornecidos pela *Cal Poly Cubesat Design Specification*, uma vez que esses nanossatélites devem ser padronizados para o posicionamento no interior do P-POD (dispositivo onde o CubeSat Mauá será acoplado e lançado em órbita) (CAL POLY SLO, 2014).

Material.

A *Cal Poly Cubesat Design Specification* recomenda o uso do alumínio 7075 ou 6061 para a estrutura do nanossatélite (CAL POLY SLO, 2014). Qualquer outro tipo de material escolhido para a estrutura do nanossatélite deve respeitar os requisitos da NASA-STD-6016 e MSFC-STD-3029 (NASA, 2006).

4.2 Testes e análises

A validação da estrutura do nanossatélite requer uma combinação de testes e análises como definido pelo GSFC-STD-7000A. Deve ser feito um modelo em elementos finitos para a estrutura. Este modelo estará sujeito aos diversos carregamentos presentes nas fases de lançamento do foguete que transportará o nanossatélite à Estação Espacial Internacional (FAGERUDD, 2014). As análises mandatórias do CubeSat são: Análise quase estática, análise modal, análise dinâmica vibratória senoidal e randômica (NASA, 2005).

Qualificação estrutural.

A qualificação estrutural tem como finalidade admitir a resistência da estrutura conforme os carregamentos quase estáticos e dinâmicos, por meio de fatores de segurança fornecidos pelo GSFC-STD-7000A. Estes fatores asseguram um baixo risco de danificação estrutural ou deformações permanentes prejudiciais ao longo da missão do satélite ou veículo espacial (NASA, 2005).

Análise modal.

A análise modal fornece as frequências naturais e formas modais para cada modo de vibração da estrutura, sendo base para qualquer tipo de análise dinâmica vibratória (NASA, 2005).

As análises dos modos de vibração devem ser feitas para cada subsistema do modelo, podendo-se verificar se este representa corretamente o comportamento dinâmico da estrutura. Os modos de vibração fornecerão a forma que a estrutura apresentará para cada frequência natural, que podem ou não aparecerem nas várias fases da missão (NASA, 2005).

Deve ser feito a análise harmônica do nanossatélite caso suas frequências naturais estejam dentro da faixa de frequência do respectivo foguete, a fim de evitar qualquer deslocamento crítico devido à ressonância. No presente trabalho, será considerada a faixa de frequência do veículo de lançamento terrestre (foguete) Soyuz (Tabela 1).

Tabela 1 – Faixa de frequência para os testes de vibração senoidal (ARIANESPACE, 2006)

Excitação Senoidal	Faixa de frequência (Hz)	Aceleração (g)	
		Ótimo	Aceitável
Longitudinal	1-5	0,52	0,40
	5-10	0,65	0,50
	10-20	1,04	0,80
	20-30	1,04	0,80
	30-40	0,65	0,50
	40-60	0,65	0,50
	60-100	0,39	0,30
Lateral	1-5	0,52	0,40
	5-10	0,78	0,60
	10-20	0,78	0,60
	20-30	0,52	0,40
	30-40	0,52	0,40
	40-60	0,39	0,30
	60-100	0,39	0,30

Caso os componentes do satélite ou veículo espacial representem 5% ou mais na massa estrutural, estes devem ser considerados na análise em questão (NASA, 2005).

Vibração randômica

A análise dinâmica vibratória randômica é necessária para prever o comportamento estrutural nas presentes condições existentes em cada fase de lançamento do FOGUETE.

A análise em questão é mandatória para satélites ou veículos espaciais com massas inferiores a 454 kg.

O espectro de densidade de aceleração (PSD) fornecido pela NASA (Tabela. 3) será utilizado para os carregamentos na análise dinâmica vibratória randômica (NASA, 2005).

Tabela 2 – Carregamentos generalizados para vibrações randômicas (NASA, 2005)

Frequência (Hz)	ASD (G^2/Hz)	
	Ótimo	Aceitável
20	0,026	0,013
20-50	+6 dB/oct	+6 dB/oct
50-800	0,16	0,08
800-2000	-6 dB/oct	-6 dB/oct
>2000	0,026	0,013

4.2 Estrutura

Para as análises, foi utilizado como modelo a atual estrutura do CubeSat Mauá presente no Instituto Mauá de Tecnologia, concebida pelo ex aluno Felipe Mahlmeister. Esta estrutura será modelada em elementos finitos, como requisitado pelo GSFC-STD-7000A (NASA, 2005).

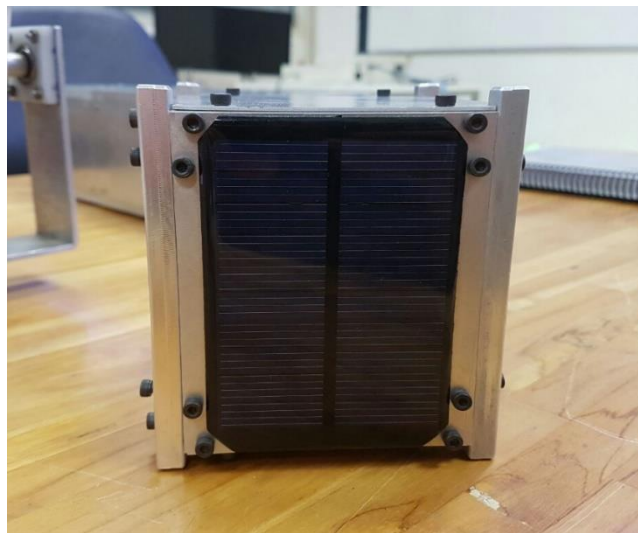


Figura 4 – Protótipo criado pelo Instituto Mauá de Tecnologia (Os Autores)

4.3 Descrição do modelo

Foi elaborado o modelo por meio do software SolidWorks, onde posteriormente será utilizado pelo ANSYS para as análises estruturais (Fig. 5). A modelagem da estrutura é feita em elementos finitos.

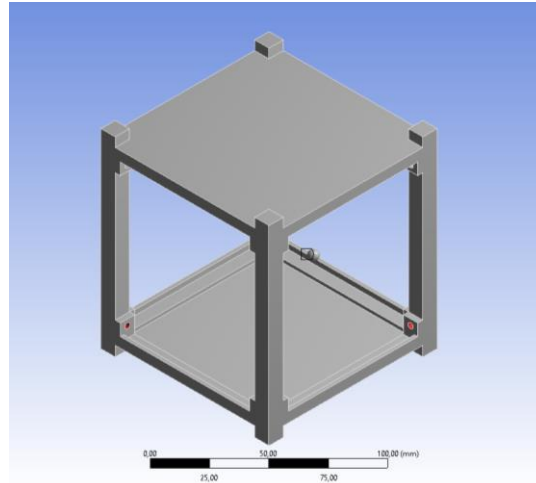


Figura 5 – Modelo criado no software SolidWorks para ser utilizado nas análises do ANSYS (Os Autores)

Material.

O material utilizado na estrutura será o alumínio 6061-T6, conforme recomendações dos requisitos da *Cal Poly Cubesat Design Specification* (CAL POLY SLO, 2014) com tensão de escoamento de 225 MPa, densidade de 2700 kg/m³ e módulo de elasticidade de 69 GPa. A escolha deste alumínio se deu por fatores orçamentários, sabendo-se este material mais barato que o alumínio 7075.

Modelo.

Foi considerada uma estrutura sólida e uma modelagem em elementos finitos, possuindo 139318 elementos e 225530 nós. A malha foi refinada nas regiões de maior tensão (Fig. 6).

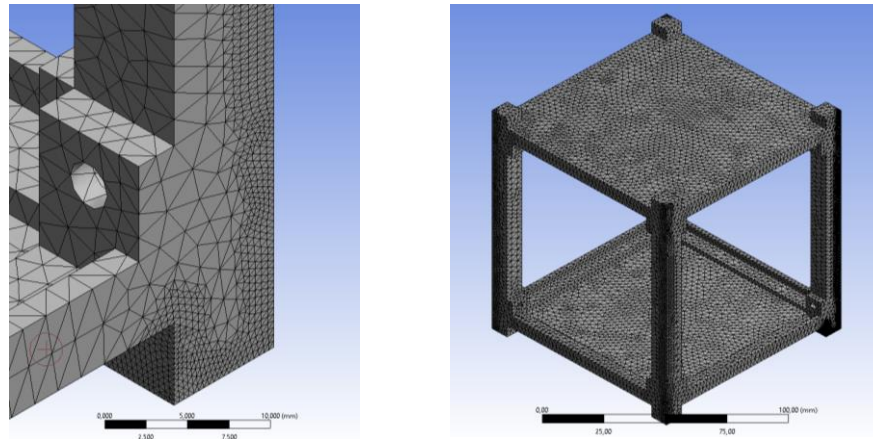


Figura 6 – Malha do modelo (Os Autores)

Foi aplicado um ponto de massa na estrutura de 0,7 kg, simulando os componentes internos do CubeSat Mauá (PCB'S, rodas de giração, cabos internos, entre outros). Este ponto de massa foi posicionado de acordo com o centro de massa dos os componentes posicionados na estrutura. Foram criadas as aberturas dos parafusos para servir como apoio do ponto de massa, simulando a força gerada pelas placas que sustentam os PCBs nos parafusos.

Condições de contorno.

Simulando o posicionamento do nanossatélite no P-POD, foram considerados apoios fixos na base da estrutura e móveis nas faces dos trilhos

Carregamentos.

Os carregamentos presentes nas diferentes fases da missão se apresentam na forma quase estática, devido à aceleração do foguete, ou vibratória (atrito do ar no exterior do foguete, pressões sonoras ou impactos) (Tabela 3). Na análise quase estática, será aplicada uma força longitudinal de 10g e lateral de 5g devido à aceleração do foguete Soyuz (FAGERUDD, 20014).

Tabela 3 – Distribuição dos carregamentos ao longo da missão (FAGERUDD, 2014)

Carregamento	Quase Estático	Vibração Senoidal	Vibração Randômica	Carregamento Acústico	Impácto
Fonte do carregamento	Aceleração do foguete	Funcionamento dos motores	Vibração dos motores, atrito do ar e ruído	Motor, atrito do ar	Separações das fases
Decolagem	Máxima aceleração longitudinal e lateral	Vibração Senoidal para operação e lençamento dos estágios/voo de cápsula	Vibração Randômica para o voo de cápsula e primeiro e segundo	Pressão Sonora	
1º Estágio					SRS para o 1º Estágio
Separação do 1º Estágio					
2º Estágio					
Descarte da casca					SRS para o descarte da casca
Separação do 2º Estágio					SRS para o 2º Estágio
3º Estágio					
Separação do 3º Estágio					SRS para o 3º Estágio
Voo de cápsula					
Separação da Cápsula					SRS para a separação da cápsula e abertura de painéis
Operação de componentes					

Qualificação estrutural.

As determinações de bons fatores de segurança para este modelo requerem uma forte experiência na área de dimensionamento de estruturas aeroespaciais. Entretanto, diversas corporações espaciais fornecem esses valores para a qualificação estrutural.

Para o presente trabalho, serão adotados os fatores de segurança fornecidos pelo GSFC-STD-7000A (Tab.4).

Tabela 4 – Fatores de segurança fornecidos pelo GSFC-STD-7000A (NASA,2005)

Fator	Valor
Fator de modelagem	1,25
Fator do material	1,25
fator de carga	1
Fator de segurança	1,56

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Análise quase estática

Após a aplicação da aceleração longitudinal e lateral (10g e 5g, respectivamente), observou-se as maiores tensões próximas as bases dos trilhos do nanossatélite, sendo a maior

tensão de 6,4 MPa (Fig.7). Entretanto, os máximos deslocamentos ocorreram nas chapas, na ordem de 10^{-3} mm.

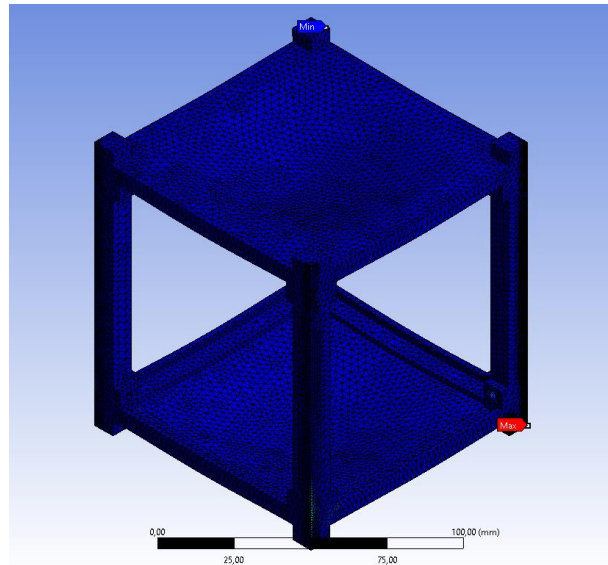


Figura 7 – Regiões de mínima e máxima tensões equivalentes com relação à análise quase estática (Os Autores)

5.2 Análise modal

Foram analisados os 8 primeiros modos naturais da estrutura, o primeiro modo possui uma frequência natural de 1064 Hz, afetando a chapa superior em sua forma modal (Fig.8). O segundo modo possui a mesma frequência do primeiro, porém, afetando a chapa inferior.

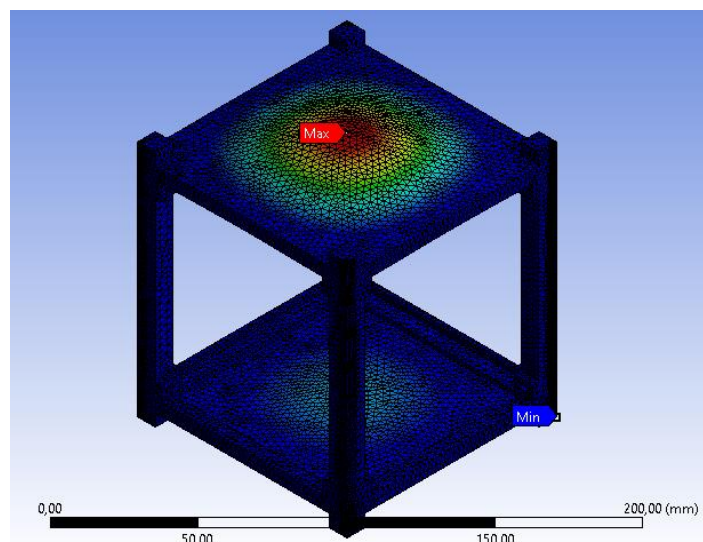


Figura 8 – Forma modal do primeiro modo de vibração (1064 Hz) (Os Autores)

O terceiro e quarto modo natural possuem frequências de 2061 Hz, também possuindo formas modais espelhadas. O mesmo também para o quinto e sexto modo de vibração (2069 Hz) e sétimo e oitavo (2948 Hz).

5.3 Análise harmônica

A análise harmônica não será realizada no presente trabalho, uma vez que as frequências naturais da estrutura em questão (1064 Hz a 2948 Hz) estão fora da faixa de frequências do veículo de lançamento Soyuz (5 Hz a 100 Hz), não havendo o fenômeno do batimento ou da ressonância.

5.4 Análise randômica

Após aplicar o PSD fornecido pela NASA, submetida aos apoios fixos na base da estrutura, pode-se observar uma tensão de 11,5 MPa, referente ao fator de escala 3σ (99,73%), nas chapas da estrutura (Fig.9).

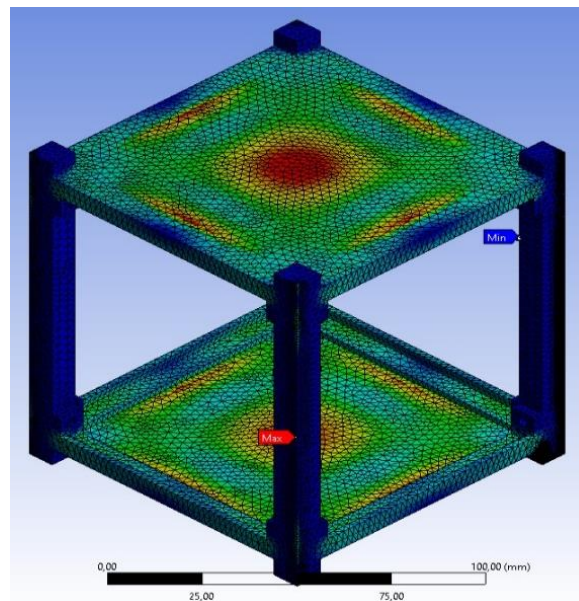


Figura 9 – Regiões de mínima e máxima tensões equivalentes com relação a análise randômica (Os Autores)

6 CONCLUSÃO

O segundo e o terceiro modo de vibração possuem uma diferença de aproximadamente 1000 Hz, o mesmo acontece do sexto para o sétimo modo natural. Isto pode ser explicado por meio das condições de contorno do modelo, que limitam quase todos os deslocamentos da estrutura. Desta forma, os primeiros 8 modos naturais afetam somente as chapas (peças sem restrição de deslocamentos). Enquanto os dois primeiros modos afetam as chapas em uma forma modal de uma concavidade, os dois modos seguintes afetam as chapas em formas modais com dupla concavidade e um ponto de inflexão, aumentando significativamente a frequência natural entre os modos.

Os resultados das análises referentes aos carregamentos quase estáticos e randômicos apresentaram tensões de 6,5 MPa e 11,5 MPa, respectivamente, ocasionando um carregamento total de 18 MPa. Comparando com a máxima tensão de escoamento do Alumínio 6061-T6, 225MPa, a presente estrutura possui um fator de segurança de 12,5, acima de 1,56. Sendo assim estrutura atual do Cubesat Mauá está em condições de ser transportada até a Estação Espacial Internacional, uma vez que possui um fator de segurança acima do exigido pelo GSFC-STD-7000A. Vale lembrar que a estrutura pode ser otimizada de tal forma a reduzir a diferença entre o fator de segurança da estrutura e do GSFC-STD-7000A, visando uma economia financeira e de materiais.

REFERÊNCIAS

AIRANESPACE. **SOYUZ From the Guiana Space Center User's Manual**, 2006.

BROWN, Robert Grover; HWANG, Patrick Y. C.. **Introduction to random signals and applied Kalman Filtering: with matlab exercises and solutions**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

CAL POLY SLO, **Cal Poly Cubesat Design Specification (CDS) Rv. 12**, The CubeSat Program, (2014).

FAGERUDD, Julie. **Stress simulation of the SEAM CubeSat structure during launch**. 2014. 85 f. Tese (Doutorado) - Curso de Project In Solid Mechanics, Kth Royal Institute Of Technology, Stockholm, 2014.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Os Satélites e Suas Aplicações**. São José dos Campos: Sindct, 2008.

HIBBELER, Russell C.. **ESTÁTICA: Mecânica Para Engenharia**. 12. ed. São Paulo: Pearson Education, 2014.

CIHAN, Melahat et al. **Flight Dynamic Analysis of ITUpSAT1**. İstanbul: Researchgate, 2014.

CIHAN, Melahat; INALHAN, Gokhan. **Flight Dynamic Analysis of ITU-pSAT2**. İstanbul: Researchgate, 2014.

LEET, Kenneth M.; UANG, Chia-ming; GILBERT, Anne M.. **Fundamentos da análise estrutural**. 3. ed. João Pessoa: Amgd Editora Ltda., 2009

MIT OPENCOURSEWARE: Engineering Dynamics. Produção de J.Vandiver e David Gossard. Massachusetts Institute of Technology, 2011. 6 videos (80 min), Video, son., color.

NASA. **General Environmental Verification Standard (GEVS) For GSFC Flight Programs and Projects**, NASA GSFC-STD-7000A, (2005).

_____. **Guidelines For The Selection Of Metallic Materials For Stress Corrosion Cracking Resistance In Sodium Chloride Environments**, MSFC-STD-3029, (2005).

_____. **Standard Materials And Processes Rqueirements For Spacecraft**, NASA-STD-(I)-6016, (2006).

RAO, Singiresu S. **Vibrações Mecânicas**. 1. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2008. xv, 424 p