



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DINÂMICA E OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA TRELIÇA ESPACIAL

Felipe Alves Pires, fealvespires@hotmail.com¹

Paulo José Paupitz Gonçalves, paulo.jpg@feb.unesp.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica - UNESP - Bauru/SP, Avenida Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CEP: 17033-360, TEL: +55 (14) 3103 6108

Resumo: Devido a crescente demanda por sistemas de comunicação, monitoramento territorial e previsão climática, frotas de satélites serão lançadas ao espaço nos próximos anos. Com o objetivo de minimizar os custos de lançamento, estruturas espaciais devem possuir forma de sistemas do tipo treliça devido à considerável redução de peso por serem montadas com materiais leves, por exemplo, alumínio. Como resultado, alguns problemas como flexibilidade e baixo amortecimento estrutural podem aparecer. Diante disso, um método de controle deve ser aplicado para manter os níveis de vibração em pequenas escalas. Neste artigo, um método de controle passivo será aplicado a uma treliça espacial utilizando o método dos elementos finitos (MEF). MEF é uma das ferramentas computacionais mais utilizadas para analisar estruturas sujeitas a vibrações, tornando possível prever as respostas em frequência (FRFs) do sistema. Esse trabalho utiliza a técnica de otimização simulated annealing para otimizar a norma H_2 para os seis primeiros modos de vibrar do sistema de maneira a encontrar as coordenadas de cada nó da treliça que minimize o valor de H_2 . Notou-se que com a minimização da norma H_2 , as amplitudes de vibração das FRFs diminuíram nas duas simulações.

Palavras-chave: Treliça Espacial, Controle Passivo, Simulated Annealing, norma H_2

1. INTRODUÇÃO

Em virtude da crescente demanda por estruturas espaciais, é de fundamental importância entender como esse tipo de sistema se comporta. Além disso, com o intuito de reduzir custos de lançamento, tais estruturas devem ser construídas com elementos feitos de materiais leves, como o alumínio. Entretanto, essa redução de peso traz flexibilidade ao sistema em razão dos componentes conterem baixo amortecimento estrutural Gonçalves *et al.* (2006), fazendo com que o sistema apresente respostas indesejadas, conhecidas como vibrações, em consequência de perturbações dos ambientes que, por ventura, tais estruturas estarão expostas.

Com o fim de manter os níveis de vibração em pequenas escalas, um método de controle deve ser aplicado. A vibração pode ser controlada utilizando métodos envolvendo controle passivo e ativo. Diferentes estratégias são utilizadas para modelar e projetar o controle de uma estrutura flexível como em Steffen Jr *et al.* (2000), que apresenta uma técnica de controle passivo em sistemas mecânicos usando absorvedores de vibração dinâmicos, Moshrefi-Torbati *et al.* (2006) apresenta um controle ativo de uma treliça tridimensional utilizando atuadores piezoelétricos empilhados. Já Abreu and Lopes Jr (2010), utiliza a técnica H_2 para o controle de vibração em uma treliça contendo atuadores piezoelétricos enquanto Fang *et al.* (2015) utiliza a técnica H_∞ (H-Infinity) de controle robusto em um giroscópio MEMS (micro electro mechanical system).

O presente trabalho emprega o convencional Método dos Elementos Finitos (MEF) para o modelamento de uma treliça espacial. Tal método é uma das ferramentas computacionais mais utilizadas para analisar estruturas sujeitas a vibrações. Zarate *et al.* (2011) utiliza tal método para análise de vibrações de treliças de geometrias variáveis, já Koohestani and Kaveh (2010) aplica esta técnica de modelamento para fazer uma análise de fadiga e vibração livre em uma treliça espacial.

Neste cenário, o uso de uma ferramenta de otimização se torna viável para estudar o comportamento da resposta em frequência do sistema devido a uma perturbação. Esta resposta é conhecida como FRF (frequency response function). O uso da técnica de otimização Simulated Annealing é uma alternativa para tal análise. Segundo Bennage and Dhingra (1995) tal procedimento faz uma analogia entre a minimização de energia em sistemas físicos e a minimização da função objetivo em sistemas estruturais. A idéia principal do Simulated Annealing é fornecer uma maneira para ignorar o valor ótimo local, sendo possível achar um valor ótimo global. Lamberti (2008) utiliza esta técnica para otimizar o design de

diferentes tipos de estruturas treliçadas variando-se o número de elementos. Já Hasançebi and Erbatur (2002) usa esta metodologia para achar um design ótimo de acordo com tamanho, forma e topologia para treliças.

O presente trabalho apresentará uma análise das FRFs para o estudo de 6 frequências naturais de uma treliça espacial. Cada frequência natural representa um modo de vibrar da estrutura. Portanto, os 6 modos de vibrar da estrutura que serão avaliados são a primeira flexão, segunda flexão, primeira torção, segunda torção, terceira flexão e quarta flexão. Essa teoria pode ser encontrada em Rao (2004). Será utilizando a ferramenta de otimização simulated annealing para minimização da norma H_2 , de maneira a encontrar as coordenadas de cada nó da treliça que resultam no menor valor de H_2 . Estas novas coordenadas do nós serão aplicadas num modelo de elementos finitos, obtendo uma nova resposta em frequência para a estrutura. Com isso, será possível investigar se, com a minimização deste valor, as amplitudes de vibração diminuem, caracterizando um método de controle passivo.

2. A ESTRUTURA

A estrutura utilizada neste trabalho está ilustrada na Fig. 1. Esta treliça contém 93 elementos feitos de alumínio com seção transversal circular de diâmetro 7 mm, 150 mm de comprimento, e 33 nós. O sistema não será engastado, simulando a condição de contorno livre-livre. Tal estrutura possui 99 graus de liberdade (gdl), visto que há 33 nós e cada um pode movimentar nas 3 direções do plano (x-y-z). Nesse caso, já que a treliça possui 99 gdl, o sistema apresenta 99 frequências naturais, portanto, 99 modos de vibrar.

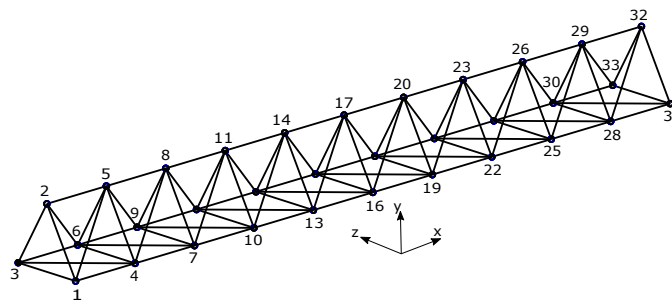


Figura 1: Treliça utilizada no modelo de Elementos Finitos.

3. ELEMENTOS FINITOS APLICADO À ESTRUTURA

Considere a treliça ilustrada na Fig. 1. O movimento do sistema é governado pela seguinte equação do movimento na forma matricial

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

onde $\mathbf{K}$ e $\mathbf{M}$ são as matrizes de rigidez e massa da estrutura, respectivamente, e de ordem 99×99 , $\mathbf{q}$ o vetor deslocamento e $\mathbf{F}(t)$ o vetor de forças externas, ambos de ordem 99×1 , obtidos por meio do modelo de Elementos Finitos utilizando elementos de treliça espacial Kwon and Bang (2000).

Como dito na seção anterior, a condição de contorno da treliça é livre-livre e não há força externa atuando no sistema a princípio, pois nessa seção o trabalho apenas se interessa a mostrar as frequências naturais e modos de vibrar da estrutura. Assim, Eq. (1) se transforma em

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = 0 \quad (2)$$

Uma vez que as matrizes de rigidez e massa do sistema são computadas para a treliça, é possível fazer uma análise através do problema do autovalor. Com o objetivo de computar as frequências naturais da estrutura, assume-se movimento harmônico para o deslocamento na forma $\mathbf{q} = \mathbf{Q} \sin(\omega t)$. A equação que resulta do problema do autovalor é dada pela Eq. (3).

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \bar{\mathbf{q}} = 0 \quad (3)$$

onde ω é a frequência natural e $\bar{\mathbf{q}}$ o vetor dos modos de vibrar, e como mencionado anteriormente são representados pelos autovalores e autovetores, respectivamente.

As frequências naturais podem ser adquiridas pela raiz quadrada da diagonal da matriz de autovalores e cada modo de vibrar pode ser computado pela coluna da matriz de autovetores referente à frequência natural. Por exemplo, se o objetivo é analisar a sétima frequência natural, seu modo de vibrar será representado pela sétima coluna da matriz de autovetores, em que cada linha denota o deslocamento de cada gdl.

Nesta simulação, adota-se os valores da literatura para as propriedades do material e, como dito anteriormente, os elementos da treliça são feitos de alumínio, portanto os valores do Módulo de Elasticidade e densidade são $E = 70 \text{ GPa}$ e $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, respectivamente.

O presente trabalho trata apenas da faixa de frequência entre 200 e 600 Hz, a qual abrange 6 modos de vibrar da treliça, de 7 à 12, que são: primeira flexão (7º), segunda flexão (8º), primeira torção (9º), segunda torção (10º), terceira flexão (11º) e quarta flexão (12º).

Figura 2 mostra os modos de vibrar bem como as respectivas frequências naturais. Vale ressaltar que eles só puderam ser obtidos através do modelo de elementos finitos assumindo que a princípio não há força externa atuando.

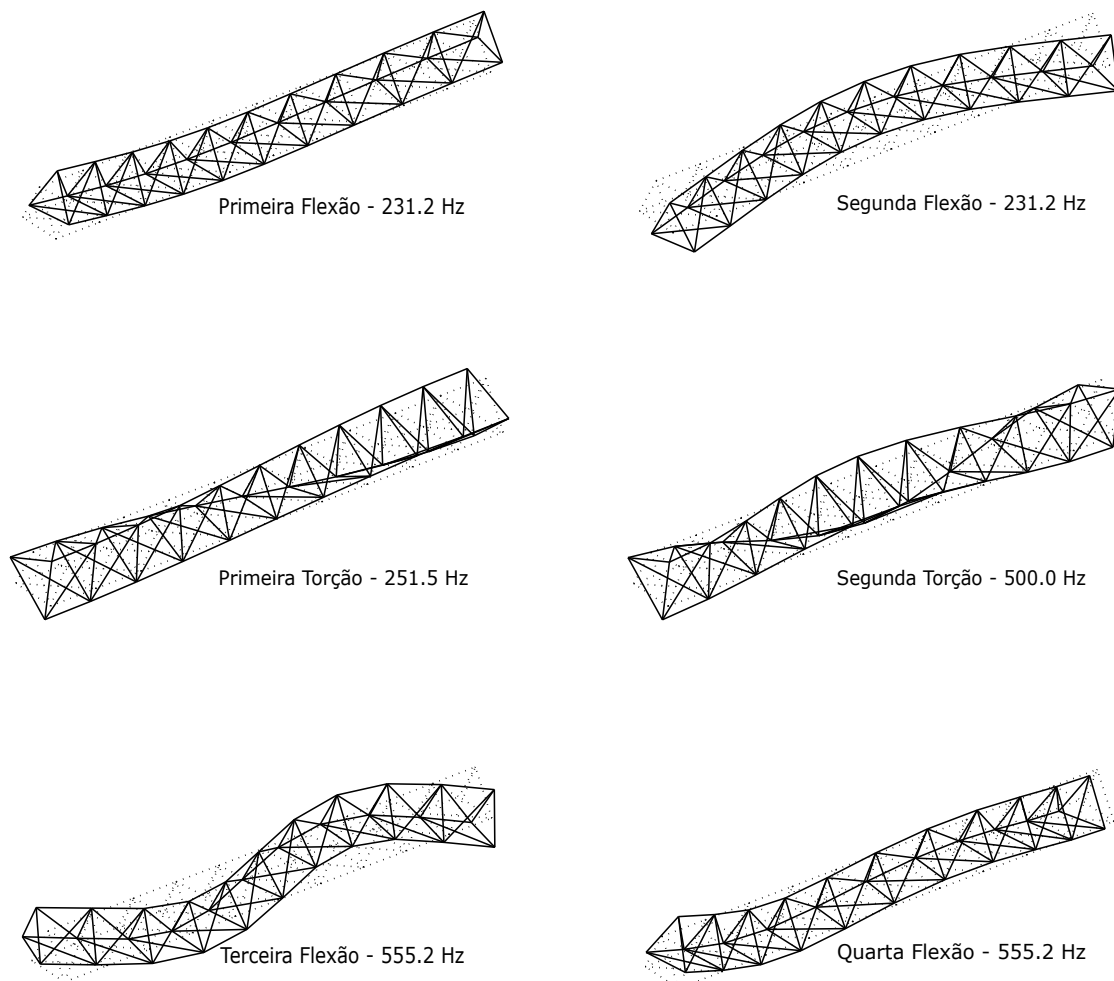


Figura 2: Modos de vibrar e frequências naturais da treliça espacial obtidas pelo MEF.

4. REPRESENTAÇÃO EM ESPAÇO DE ESTADOS

Um sistema linear invariante no tempo (LIT) de dimensões finitas é descrito pelas equações abaixo

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \mathbf{x}\end{aligned}\tag{4}$$

com condição de estado inicial $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$. Nas equações acima, $\mathbf{x}$ é o vetor de estados de dimensão N , $\mathbf{x}_0$ é a condição inicial de estados, $\mathbf{u}$ é o vetor de entrada do sistema de dimensão s e $\mathbf{y}$ o vetor de saída do sistema com dimensão r . As matrizes $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ e $\mathbf{C}$ são matrizes reais e constantes de dimensões $N \times N$, $N \times s$ e $r \times N$, respectivamente.

Além disso, a representação em espaço de estados de um sistema pode ser representado, de maneira alternativa, por sua função transferência. A função transferência $G(s)$ é definida na Eq. (5)

$$G(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}\tag{5}$$

4.1 Representação da Trelça no Espaço de Estados

Com o objetivo de se fazer simulações de dinâmica estrutural e análise de controle, é conveniente representar equações de estruturas flexíveis em espaço de estados, como em 4.

Supõe-se que o sistema em estudo possua a equação do movimento,

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{q} &= \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_0\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}_q\mathbf{q} + \mathbf{C}_v\dot{\mathbf{q}}\end{aligned}\quad (6)$$

Supondo que,

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix}\quad (7)$$

A representação em espaço de estados para o sistema será então,

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{x}_1 - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}\mathbf{x}_2 + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_0\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}_{oq}\mathbf{x}_1 + \mathbf{C}_{ov}\mathbf{x}_2\end{aligned}\quad (8)$$

onde $\mathbf{M}$ e $\mathbf{K}$ são as matrizes de massa e rigidez, respectivamente, representadas na Eq. (1). A matriz $\mathbf{D}$ é chamada matriz de amortecimento proporcional ou estrutural, a qual é proporcional a matriz de rigidez, visto que é comum assumir amortecimento proporcional para este tipo de análise. Vale lembrar que anteriormente não foi utilizado uma matriz de amortecimento para a obtenção dos modos de vibrar porque tal matriz não é necessária para esta finalidade. Na presente análise, é possível fazer uso de uma matriz que representa o amortecimento, tendo em mente que sistemas reais possuem algum tipo de mecanismo para dissipação de energia. Após alguns testes, adotou-se que $\mathbf{D} = 10^{-6}\mathbf{K}$.

Sabendo que $(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C})$ são os parâmetros de espaços de estados da Eq. (4) e combinando as equações acima, é possível obter as equações de estado,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [\mathbf{C}_{oq} \quad \mathbf{C}_{ov}], \quad (9)$$

onde as matrizes $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ e $\mathbf{C}$, para o caso da estrutura em estudo, possuem dimensões 198×198 , 198×1 e 99×198 , respectivamente.

As matrizes $\mathbf{B}$ e $\mathbf{C}$, são as matrizes de entradas e saídas do sistema, nesta ordem. O parâmetro $\mathbf{B}_0$ é equivalente ao vetor $\mathbf{F}(\mathbf{t})$ da Eq. (1), pois no caso do sistema, a entrada será uma força. Já $\mathbf{C}_{oq}$ e $\mathbf{C}_{ov}$ são as matrizes de saída de deslocamentos e velocidades, respectivamente, e ambas possuem dimensão 99×99 . Tais matrizes possuem valores em suas diagonais, sendo esses valores, 0 ou 1.

5. NORMAS DE UM SISTEMA

As normas de um sistema são utilizadas para medir a intensidade da resposta de uma estrutura sob alguma excitação, como por exemplo, uma força, ruído branco e impulso *unit*. O uso desta técnica permite a comparação entre diferentes sistemas. Existem três tipos de normas: H_2 , H_∞ e Hankel, ambos valores adimensionais. O presente trabalho propõe o estudo para verificar se ao minimizar a norma H_2 , é possível otimizar a resposta em frequência da estrutura citada acima. Considere que o sistema da Fig. 1 seja um sistema discreto no domínio da frequência. Para estruturas na representação modal, teoria demonstrada em Gawronski (2004), considerando (A_{mi}, B_{mi}, C_{mi}) a representação modal em espaço de estados, cada modo de vibrar é independente de maneira que as normas de cada modo de vibrar são independentes também.

5.1 A Norma H_2

Define-se $\Delta\omega_i$ como a frequência de meia potência na i th ressonância, $\Delta\omega_i = 2\zeta_i\omega_i$, ver Clough and Penzien (1975). Deixe $G_i(\omega) = C_{mi}(j\omega I - A_{mi})^{-1}B_{mi}$, ser a função transferência do i ésimo modo de vibrar da estrutura, onde I é a matriz identidade. Percebe-se que tal função transferência está no domínio da frequência. A norma H_2 do i ésimo modo de vibrar é dado pela Eq. (10)

$$\|G_i\|_2 \cong \frac{\|B_{mi}\|_2 \|C_{mi}\|_2}{2\sqrt{\zeta_i}\omega_i} = \frac{\|B_{mi}\|_2 \|C_{mi}\|_2}{\sqrt{2}\Delta\omega_i} \cong \gamma\sqrt{2\Delta\omega_i}\quad (10)$$

5.2 A Norma H_2 da Estrutura

A norma H_2 de uma estrutura é expressa em termos de normas de cada modo de vibrar, mostradas na seção anterior. Seguindo a teoria apresentada por Gawronski (2004), a norma H_2 do sistema é aproximadamente a soma *rms* das normas de cada modo de vibrar, mostrada na Eq. (11).

$$\|G\|_2 \cong \sqrt{\sum_{i=1}^n \|G_i\|_2^2} \quad (11)$$

onde n é o número de modos de vibrar.

Para tal simulação, os seis primeiros modos de vibrar da treliça não serão considerados, pois estes são os modos de corpo rígido da estrutura. Nesta seção, o sistema passará a ser um sistema forçado de maneira que seja possível obter a resposta em frequência da estrutura. Considera-se que existe uma força externa de magnitude $1N$ atuando no nó 1 da treliça na direção positiva de y , ou seja, $\mathbf{B}_0(2,1) = 1$, ver Eq. (9). Além disso, a matriz de saídas $\mathbf{C}$ será configurada de uma maneira que a resposta devido a força aplicada no nó 1 será verificada nos 3 últimos nós da treliça, nós 31, 32 e 33. Como o trabalho pretende apenas obter a resposta em deslocamentos, C_{ov} será uma matriz de zeros, 99×99 . Já C_{oq} será montada de tal maneira que só terá valores nas diagonais referentes aos graus de liberdade dos 3 nós que se quer verificar a resposta.

Portanto, a norma H_2 do sistema, considerando apenas os modos de vibrar de 7 à 99, apresenta o valor de $H_2^{sistema} = 4.8259 \cdot 10^{-4}$.

Como mencionado anteriormente, o objetivo do trabalho é o estudo apenas da faixa de frequência entre 200 Hz e 600 Hz, a qual compreende as 6 frequências naturais de interesse. Portanto, a norma H_2 desta faixa de frequência, que representa os modos de vibrar de 7 à 12, possui o valor de $H_2^{(7-12)} = 4.8091 \cdot 10^{-4}$.

Percebe-se que o valor da norma H_2 do sistema e dos 6 primeiros modos de vibrar são próximos. Isso mostra que, provavelmente, são os primeiros modos de vibrar que possuem os maiores valores modais da norma H_2 , o que os caracteriza como sendo os mais significativos em relação ao sistema. Por isso escolheu-se estudar apenas a faixa de frequência que compreende estes modos de vibrar.

6. SIMULATED ANNEALING

Simulated Annealing é um método para resolver problemas de otimização de sistemas livres e sistemas com restrições. A cada iteração do algoritmo desse método, um novo ponto é aleatoriamente gerado. O algoritmo aceita todos os novos pontos que diminuem a função objetivo, mas também, com uma certa probabilidade, aceita pontos que aumentam tal objetivo. Aceitando-se pontos que aumentam a função objetivo, o algoritmo evita ficar preso em pontos de mínimo local e é capaz de procurar globalmente por mais soluções. O procedimento programa uma maneira de sistematicamente diminuir a função objetivo ao passo que o programa é rodado. À medida que o objetivo diminui, o algoritmo reduz a extensão da busca de modo a convergir para um valor mínimo.

6.1 Simulated Annealing Aplicado à Estrutura

Este método foi utilizado neste trabalho de maneira que se pudesse obter um valor mínimo da norma H_2 dos 6 modos de vibrar citados acima, variando-se as coordenadas dos 33 nós da treliça. Isso é possível, atribuindo-se um valor inicial, além de um limite inferior e superior para cada coordenada nodal. Foram feitas 2 simulações utilizando diferentes valores para os limites inferior e superior. Considerando-se que X_0 seja o vetor das coordenadas dos nós da treliça original mostrada na Fig. 1.

Na primeira simulação, usou-se um limite inferior igual à $X_0 - 0.01$ e um limite superior igual à $X_0 + 0.01$. O valor da norma H_2 minimizada para esta situação foi de $H_2 = 3.4316 \cdot 10^{-4}$. Com isso, uma nova matriz de coordenada dos nós foi obtida. Na segunda simulação, usou-se um limite inferior igual à $X_0 - 0.02$ e um limite superior igual à $X_0 + 0.02$. O valor da norma H_2 minimizada para a segunda situação foi de $H_2 = 3.0871 \cdot 10^{-4}$. Tais valores para os limites inferior e superior de ± 0.01 e ± 0.02 , foram adotados após alguns testes, já que com apenas estes limites, os valores de norma H_2 variavam, por isso decidiu-se por assumir tais valores para os limites. Dessa maneira, uma segunda matriz para as coordenadas nodais pôde ser obtida para cada situação. Verificou-se que ao passo que a faixa de valores para cada coordenada dos nós aumentou devido aos limites inferior e superior, o valor minimizado da norma H_2 , diminuiu.

Figura 3 compara a treliça não-modificada com a treliça de coordenadas dos nós otimizadas para minimização da norma H_2 das duas simulações.

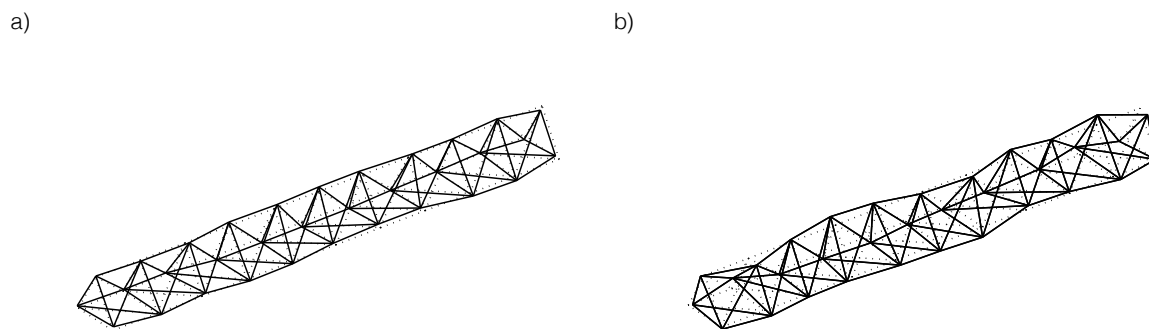


Figura 3: Comparação da treliça não-modificada e modificada: a) para faixa de ± 0.01 . b) para faixa de ± 0.02 .

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção faz uma análise das FRFs, comparando a curva da treliça não-modificada com aquelas encontradas para as coordenadas dos nós em cada simulação na minimização da norma H_2 .

Tais curvas de resposta em frequência são obtidas a partir do modelo de elementos finitos. Para a obtenção das seguintes curvas, foi considerado também que a matriz de amortecimento é proporcional a matriz de rigidez, assim, $\mathbf{D} = 10^{-6} \mathbf{K}$. Essas respostas são computadas por meio da resposta em frequência em deslocamento. As FRFs são então geradas utilizando uma função custo. Esta função custo é calculada pela soma dos quadrados das respostas dos graus de liberdade dos nós que se quer verificar a resposta. Os valores da função custo, para melhor verificação do gráfico, são convertidos para a escala em decibéis (dB) e então são geradas as curvas de frequência. O eixo das ordenadas representa os valores de amplitude em (dB) e o eixo das abscissas os valores de frequência, que no caso será utilizada a faixa de frequências de 200-600 Hz. Figura 4 apresenta as respostas em frequência das funções custo da treliça com coordenadas dos nós modificadas para minimização da norma H_2 para as 6 primeiras frequências naturais para as duas faixas de limites inferior e superior: 0.01 e 0.02. A linha sólida representa a resposta em frequência da treliça não-modificada, já as linhas pontilhadas representam a resposta em frequência da treliça com coordenadas dos nós modificadas e otimizadas para minimização da norma H_2 para os 6 primeiros modos de vibrar da estrutura.

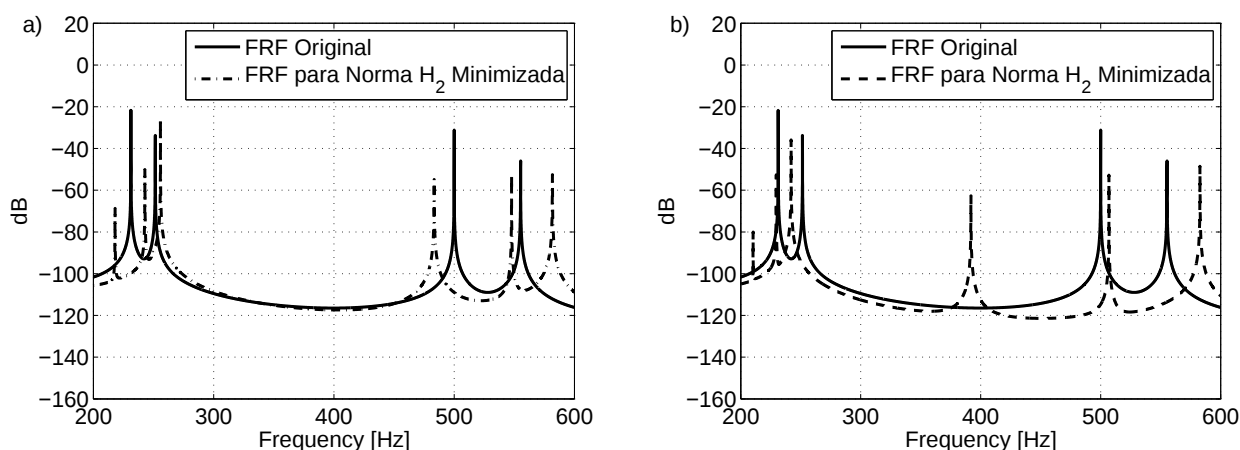


Figura 4: Respostas em frequência das funções custo da treliça com coordenadas dos nós modificadas para minimização da norma H_2 para as 6 primeiras frequências naturais: a) para faixa de ± 0.01 . b) para faixa de ± 0.02 .

É evidenciado na Fig. 2 que a frequência natural de 231.2 Hz representa os modos de vibrar da primeira flexão e segunda flexão. Já a frequência natural de 555.2 Hz representa os modos de vibrar da terceira flexão e quarta flexão. Isso explica o porquê de existir 4 picos de ressonância na FRF original mostrada na Fig. 3, mas que na realidade existem 6.

Percebe-se que houve uma diminuição das amplitudes de vibração. Isso mostra que para a metodologia adotada de controle passivo, que é encontrar as coordenadas nodais otimizadas para minimização do parâmetro norma H_2 , foi efetiva. Para ambos os casos, verifica-se que houve uma maior diminuição dos picos de vibração para as 3 primeiras frequências naturais mostradas do gráfico. Observa-se também que houve um deslocamento das frequências naturais dos 6 modos de vibrar em estudo. Tabela 1 mostra os valores das frequências naturais para os dois casos mostrados na Fig. 3.

Como dito anteriormente, observou-se uma maior diminuição das amplitudes de vibração das 3 primeiras frequências naturais de ambos os casos. Porém, percebeu-se que para o segundo caso, em que a faixa para os limites inferior e superior foi de 0.02, esta diminuição de amplitude foi mais significativa em relação ao primeiro caso. Então, optou-se por verificar

Tabela 1: Frequências naturais da treliça com nós otimizados para faixa de valores de 1% e 2%.

f_n	Faixa 1%-Hz	Faixa 2%-Hz
f_1	218.0	210.3
f_2	242.9	229.6
f_3	255.8	242.0
f_4	483.4	391.9
f_5	547.7	507.0
f_6	581.7	582.8

como estão os 6 modos de vibrar em estudo da treliça modificada do segundo caso. Figura 5 mostra como esses modos de vibrar da treliça modificada para faixa de 0.02 passaram a se comportar.

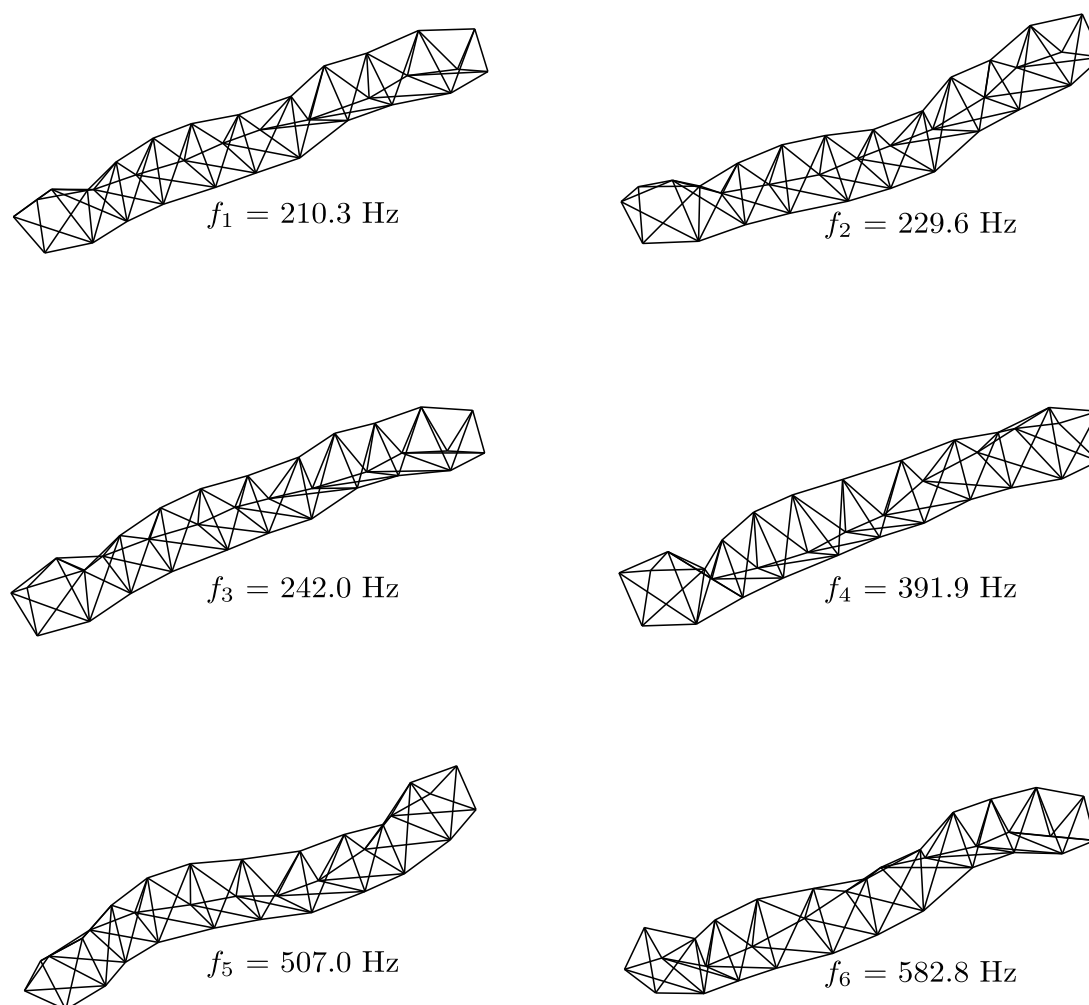


Figura 5: Modos de vibrar e frequências naturais da treliça espacial obtidas pelo MEF.

Ao comparar Fig. 5 com Fig. 2, percebe-se que os modos de vibrar alteraram, como por exemplo para a primeira e segunda torção, que para a treliça não-modificada eram bem definidos, porém com a mudança nodal, não se pode afirmar que as terceira e quarta frequências naturais representam tais modos de vibrar.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propõe o estudo de um controle passivo aplicado a uma treliça espacial. Para isso, utilizou-se o método tradicional de elementos finitos. Foi introduzido o conceito de norma H_2 , a qual consiste em um parâmetro para medir intensidade da resposta de uma estrutura sob alguma excitação. Juntamente com o MEF, a técnica de otimização simulated annealing foi utilizada para encontrar as coordenadas de cada nó da treliça que minimizam o valor da norma H_2 de 6 modos de vibrar da treliça em estudo. Duas simulações foram executadas neste estudo, uma utilizando uma faixa de

valores para as coordenadas nodais de ± 0.01 e outra para uma faixa de ± 0.02 . Com isso, foram encontradas duas novas coordenadas nodais da estrutura que minimizaram o valor da norma H_2 . Observou-se que para a faixa de 0.02, o valor encontrado para a norma H_2 dos 6 modos de vibrar em estudo foi o menor. Então, para cada nova coordenada nodal, foram obtidas FRFs, comparando-as com a FRF original da treliça. Percebeu-se que as amplitudes de vibração diminuíram ao passo que o valor da norma H_2 diminuiu para ambos os casos, mostrando que o método de controle passivo utilizado foi eficaz.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior) pelo apoio financeiro durante essa pesquisa.

10. REFERÊNCIAS

- Abreu, G.L.C.M.D. and Lopes Jr, V., 2010. "H2 optimal control for smart truss structure".
- Bennage, W.A. and Dhingra, A.K., 1995. "Single and multiobjective structural optimization in discrete-continuous variables using simulated annealing". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 38, No. 16, pp. 2753–2773.
- Clough, R.W. and Penzien, J., 1975. "Dynamics of structures". Technical report.
- Fang, Y., Fei, J. and Wang, S., 2015. "H-infinity control of mems gyroscope using ts fuzzy model". *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, No. 14, pp. 241–246.
- Gawronski, W., 2004. *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*. Springer Science & Business Media.
- Gonçalves, P.J.P., Brennan, M.J. and Elliott, S., 2006. "Active vibration control of space truss structures: Power analysis and energy distribution". In *Proceedings of ISMA-International Conference on Noise and Vibration*.
- Hasançebi, O. and Erbatur, F., 2002. "Layout optimisation of trusses using simulated annealing". *Advances in Engineering Software*, Vol. 33, No. 7, pp. 681–696.
- Koohestani, K. and Kaveh, A., 2010. "Efficient buckling and free vibration analysis of cyclically repeated space truss structures". *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 46, No. 10, pp. 943–948.
- Kwon, Y.W. and Bang, H., 2000. *The Finite Element Method Using MATLAB*. CRC press.
- Lamberti, L., 2008. "An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures". *Computers & Structures*, Vol. 86, No. 19, pp. 1936–1953.
- Moshrefi-Torbati, M., Keane, A.J., Elliott, S.J., Brennan, M.J., Anthony, D.K. and Rogers, E., 2006. "Active vibration control (avc) of a satellite boom structure using optimally positioned stacked piezoelectric actuators". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 292, No. 1, pp. 203–220.
- Rao, S.S., 2004. *Mechanical Vibrations*. Pearson/Prentice Hall. ISBN 9780130489876. URL <https://books.google.com.br/books?id=BM22QgAACAAJ>.
- Steffen Jr, V., Rade, D.A. and Inman, D.J., 2000. "Using passive techniques for vibration damping in mechanical systems". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. 22, No. 3, pp. 411–421.
- Zarate, I.O.D., Aguirrebeitia, J., Avilés, R. and Fernández, I., 2011. "A finite element approach to the inverse dynamics and vibrations of variable geometry trusses". *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 47, No. 3, pp. 220–228.

DYNAMIC ANALYSIS AND STRUCTURAL OPTIMIZATION OF A SPACE LATTICE STRUCTURE

Felipe Alves Pires, fealvespires@hotmail.com¹

Paulo José Paupitz Gonçalves, paulo.jpg@feb.unesp.br¹

¹Department of Mechanical Engineering - UNESP - Bauru/SP, 14-01 Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube Avenue, ZIP: 17033-360, PHONE: +55 (14) 3103 6108

Abstract: *Due to the need for telecommunication, territorial monitoring and weather forecast, fleets of satellites will be launched in the next few years. In order to minimize shuttle launch costs, space structures should have the shape of trusses because of the significant weight reduction by being assembled with elements made of light materials (e.g. aluminum). As a result of it, some problems such as flexibility and low structural damping may arise. For this reason, a control method must be applied to maintain the requirements of vibration levels in these types of structures. In this paper, a passive vibration control will be applied to a space lattice structure utilizing the Finite Element Method (FEM). FEM is one of the most used computational tools to analyze structures under vibrations and is also used to predict the system's frequency response functions (FRFs). This paper utilizes the optimization technique simulated annealing in order to optimize the H_2 norm of the first six vibration modes of the system so that it's possible to find the coordinates of each node of the lattice structure that minimize the value of H_2 . It has been noticed that with the minimization of the H_2 norm, the amplitudes of vibration in the FRFs diminished in both simulations.*

Keywords: *Space Lattice Structure, Passive Control, Simulated Annealing, H_2 norm*