



ANÁLISE DE INCERTEZAS EM PROJETOS UTILIZANDO SISTEMA PASSIVOS DE ABSORÇÃO

Mariana M. Americano da Costa (*)

Daniel Alves Castello ()**

Carlos Magluta (*)

Ney Roitman (*)

marianamiglioac@gmail.com

(*)Laboratório de Estruturas e Materiais – PEC/COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco I-216, Ilha do Fundão,
CEP: 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil,

(**)Laboratório de Acústica e Vibrações – PEM/COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco G-201, Ilha do Fundão,
CEP: 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil,

Abstract. O objetivo do trabalho é avaliar o impacto de incertezas na eficiência de projetos com sistemas passivos de absorção acoplados. A busca de um parâmetro ótimo do sistema adicional foi realizada através do algoritmo de otimização *Particle Swarm* (PSO) e, o método de simulação de Monte Carlo é utilizado para propagação das incertezas no modelo considerando diferentes cenários. Os resultados mostram que estas análises são imprescindíveis no projeto pois permitem mensurar a variabilidade dos índices de desempenho.

Keywords: *Sistemas passivos de absorção, Incertezas.*

1 INTRODUÇÃO

O sistema de controle passivo é uma alternativa simples e eficiente para reduzir as amplitudes de vibração em estruturas. Estes sistemas são constituídos por massas, molas e amortecedores, sintonizados para um modo de vibração particular da estrutura sobre a qual estão instaladas. A boa calibração destes parâmetros é imprescindível para a eficiência do projeto.

A definição dos parâmetros ótimos dos sistemas passivos sob diferentes tipos de excitação é um tema amplamente estudado na literatura (Den Hartog, 1956; Jangid, 1999). Entretanto os trabalhos geralmente consideram modelos determinísticos, com parâmetros constantes, sem considerar qualquer tipo de incerteza (Moreno, 2010).

Projetos estruturais estão associados a níveis altos de incertezas relacionadas à fabricação e operação, tais como características mecânicas, carga externa e parâmetros geométricos (Mrabet et al., 2015a); medições revelam claramente a variabilidade e aleatoriedade nos diferentes parâmetros do modelo (Schuëller et al., 2008). Para representar esta variação era usual considerar hipóteses simplificadoras, como a definição de valores médios dos parâmetros, valores extremos, ou até fator de segurança. Entretanto esta simplificação afastava a ideia de projetos econômicos e confiáveis (Mrabet et al., 2015b). Por exemplo, projetos obtidos por modelos determinísticos podem tornar-se inviáveis quando considera-se que alguns parâmetros do projeto possuem certo nível de incerteza (Schuëller et al., 2008).

Levando em consideração também a sensibilidade do sistema de absorção a variação da frequência natural da estrutura principal, a análise das incertezas existentes devem ser essencial para se obter um bom projeto deste dispositivo adicionado a estrutura. A aplicação de procedimentos de projeto que consideram incertezas garante que o sistema analisado funcionará dentro das margens prescritas com uma certa confiabilidade (Schuëller et al., 2008).

Neste contexto, a construção de projetos robustos e a otimização robusta, ou seja, a metodologia de busca de soluções que não são muito sensíveis às incertezas dos parâmetros e, ao mesmo tempo, proporcione um desempenho satisfatório do sistema tornou-se objeto de estudo frequente (Mrabet et al., 2015). As medidas de robustez podem ser realizadas a partir de simulações como de Monte Carlo (Venzani, 2014).

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto das incertezas na eficiência de uma estrutura com sistemas de absorção acoplados. Para isto, foram considerados desvios no sistema principal e no dispositivo, isoladamente e simultaneamente.

2 MODELO NUMÉRICO

Neste trabalho foi utilizado como base um programa desenvolvido por Pereira (2016) em elementos finitos tridimensionais para análise dinâmica de um edifício.

O programa foi desenvolvido em MATLAB e foram implementadas alterações nas matrizes de rigidez, massa e amortecimento devido a inclusão dos sistemas de absorção que também são modelados por elementos discretos, acoplados na estrutura principal. Esta formulação permite a análise do problema no domínio da frequência.

Os sistemas de absorção também foram representados por um sistema massa-mola-amortecedor de 1 GL que é acoplado diretamente aos graus de liberdade da estrutura principal. A Figura 1 ilustra, de forma simplificada, a metodologia utilizada nesta formulação para a situação na qual são adicionados à estrutura principal um sistema de absorção, representado por 1 GL.

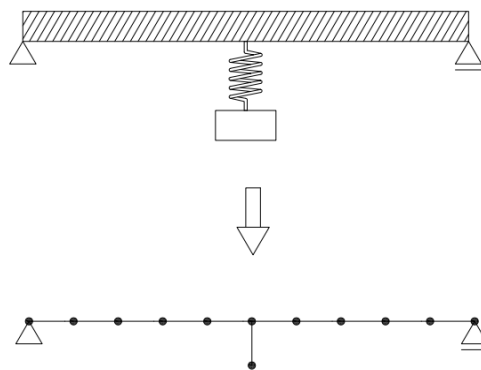


Figura 1. Metodologia utilizada para formulação numérica, adaptado de Torres (2010)

Na Figura 1 cada ponto representa um nó o qual, pode possuir até 6 graus de liberdade. Por outro lado, cada um dos elementos do sistema de absorção são discretizados como sendo um único grau de liberdade associado a um dos graus referente ao nó da estrutura. Desta forma, se a estrutura principal for discretizada com “m” GL, e for acoplado

um conjunto de “n” sistemas de absorção, o modelo computacional da estrutura irá possuir “m + n” GL.

Como as malhas utilizadas para representar as estruturas podem ser compostas por inúmeros graus de liberdade, torna-se necessário a utilização de metodologias eficientes para obter os parâmetros modais.

A equação que expressa o equilíbrio dinâmico de um sistema dinâmico é dada por:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = F(t) \quad (1)$$

M, C, K - Matrizes de massa, amortecimento e rigidez respectivamente de dimensões n x n.

$\ddot{u}, \dot{u}, u, F(t)$ - Vetores de deslocamento, velocidade, aceleração e de força respectivamente de $n \times 1$.

Para o modelo numérico apresentado as matrizes $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ e $\mathbf{K}$ são construídas da seguinte maneira, respectivamente:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} mp_1 & & & \\ & mp_m & & \\ & & ma_1 & \\ & & & ma_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} cp_1 + ca_1 & & -ca_1 & \\ & cp_n + ca_n & & -ca_n \\ & & ca_1 & \\ -ca_1 & -ca_n & & ca_n \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} kp_1 + ka_1 & & -ka_1 & \\ & kp_n + ka_n & & -ka_n \\ & & ka_1 & \\ -ka_1 & -ka_n & & ka_n \end{bmatrix}$$

Sendo p a representação do sistema principal e variando de 1 até m graus de liberdade, e a , o sistema de absorção, variando de 1 até n graus de liberdade.

Para o modelo numérico apresentado, os termos $\mathbf{M}$ e $\mathbf{K}$ da equação podem ser obtidos através do método de elementos finitos e a matriz de amortecimento $[\mathbf{C}]$ da estrutura principal é formulada como combinação linear das matrizes de massa $[\mathbf{M}]$ e rigidez $[\mathbf{K}]$, através da hipótese de *Rayleigh*, a formulação pode ser vista completa em Clough & Penzien (1993).

O acoplamento do sistema de absorção ao sistema principal faz com que a matriz de amortecimento da “Estrutura + Sistema de Absorção” perca esta característica, não sendo mais possível adotar a hipótese de *Rayleigh*, ou seja, a matriz passa a ser não proporcional, para esta situação ver detalhes em Pereira (2016).

A resolução numérica do sistema “Estrutura + Sistema de Absorção” composto por “ $m+n$ ” graus de liberdade recai em um problema onde os autovetores e autovalores são complexos, para resolução deste problema é utilizado um algoritmo do próprio MATLAB baseado na técnica QZ.

Todas as informações para o cálculo dos parâmetros modais do sistema “Estrutura + Sistema de Absorção” e coordenadas modais são fornecidas na saída do programa utilizado.

3 PROJETO ÓTIMO DO SISTEMA DE ABSORÇÃO

Com o intuito de maximizar o desempenho do sistema de absorção, a busca por um parâmetro ótimo torna-se fundamental. Segundo Magluta (1993) a partir de uma relação entre a massa do absorsor e massa modal da estrutura de aproximadamente 0.20, o acréscimo de massa não provoca ganhos de eficiência e outros fatores relacionados ao projeto como sobrecarga e, a alteração da massa não pode ser um fator determinante para eficiência, foi considerado a rigidez um parâmetro de busca fundamental, para tal finalidade.

Sendo a rigidez (K_a) do sistema de absorção o parâmetro de busca, a função objetivo (OF) pode ser definida como sendo:

$$OF1 = \frac{\max A(\boldsymbol{\psi}, \boldsymbol{\theta})}{A_o(\boldsymbol{\psi})} \quad (2)$$

A = Amplitude do sistema Estrutura com sistemas de absorção

A_o = Amplitude do Sistema original

$\boldsymbol{\psi} = [\psi_1, \dots, \psi_n]$: Parâmetros da estrutura

$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_n]$: Parâmetros do sistema adicional

A restrição do parâmetro K_a do sistema secundário, foi definido através da relação de frequência (ω_a / ω_p). Este parâmetro foi limitado em torno de 25% do valor ótimo determinado pelas expressões propostas por Den Hartog (1956).

Considerando o espaçamento da frequência dos sistemas adicionais um fator relevante para eficiência quando existem mais de um sistema, foi adicionada uma função objetivo a OF1 de tal forma que considerasse os dois objetivos ponderados por peso. Esta segunda função objetivo define o mesmo espaçamento entre as frequências deste sistema.

Para a função objetivo foi considerado o algoritmo de otimização enxame de partícula (PSO) desenvolvido por (Kiranyaz et al., 2014; Kennedy et al., 1995), e de acordo com estudos esta metodologia apresenta uma boa aproximação e eficiência.

4 INCERTEZAS

Incertezas relacionadas a aferição dos parâmetros, geometria da estrutura, cargas externas, e outros aspectos construtivos quando não são levados em conta no projeto podem comprometer a eficiência dos sistemas acoplados. Devido a poucos fenômenos serem de natureza determinística, foi feita uma análise através de simulações de Monte Carlo considerado incertezas na estrutura principal e no sistema de absorção.

Para o sistema principal e o sistema de absorção, considera-se desvios na rigidez através do Módulo de elasticidade (E) e do parâmetro de rigidez K_a , respectivamente. Os valores destas variáveis foram definidos de modo a se obter uma relação de frequência em torno de 25% da relação ótima. Sendo,

$$\frac{\omega_{\text{absorção}}}{\omega_{\text{original}}} \in [3/4, 5/4] \quad (3)$$

5 APLICAÇÃO

Neste item serão apresentadas as análises utilizando os conceitos e as ferramentas numéricas descritas anteriormente.

O sistema estrutural estudado é representado por uma viga metálica bi-apoiada, ilustrada na Figura 2. Esta estrutura montada no LADEPIS/LABEST do programa de Engenharia Civil da COPPE foi utilizada na pesquisa de Magluta (1993) e, em outros estudos tal como o de Torres (2010).

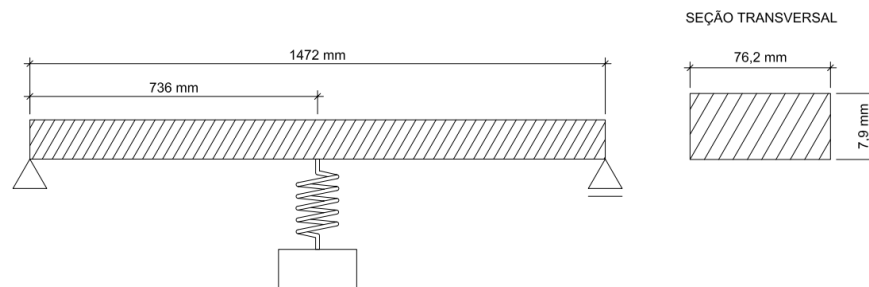


Figura 2. Viga com 1 Sistema de absorção acoplado

A Tabela 1 apresenta a correlação entre os valores numérico e experimentais aferidos por Magluta (1993), para a estrutura principal com o sistema de absorção localizado no meio do vão. Este dispositivo foi calibrado com frequência natural igual a 8.1 Hz e coeficiente de amortecimento igual a 2.0 N.s/m.

Tabela 1. Comparativo entre os dados numéricos e experimentais da estrutura com um dispositivo

Modo	Numérico		Experimental (Magluta,1993)	
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Freq. (Hz)	ξ (%)
1a	6.89	1.88	6.54	1.91
1b	9.98	2.92	9.94	2.76

Foi realizada uma análise preliminar para verificar o comportamento da FRF da estrutura otimizada, com 1 e 2 sistemas e comparada a FRF obtida através dos parâmetros ótimos de Den Hartog. Vale ressaltar que foi considerado, em todas as situações, os sistemas localizados no meio do vão e a massa total é a mesma para a situação com 1 e 2 sistemas. Conforme visto na Figura 3, a resposta da estrutura obtida pelo algoritmo de otimização se aproxima da de Den Hartog, porém ao acrescentar mais um sistema esta resposta se torna a mais eficiente.

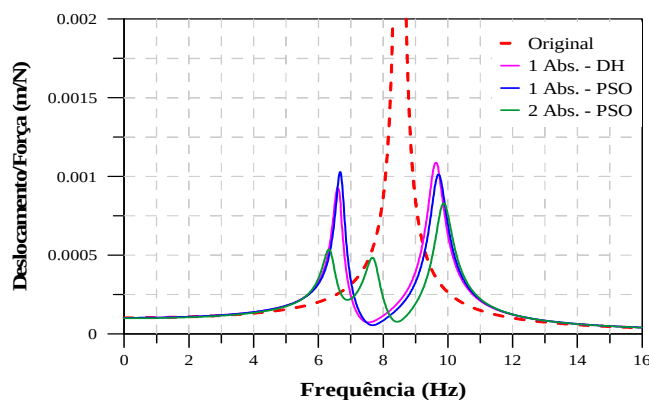


Figura 3. Comparativo entre DH e PSO

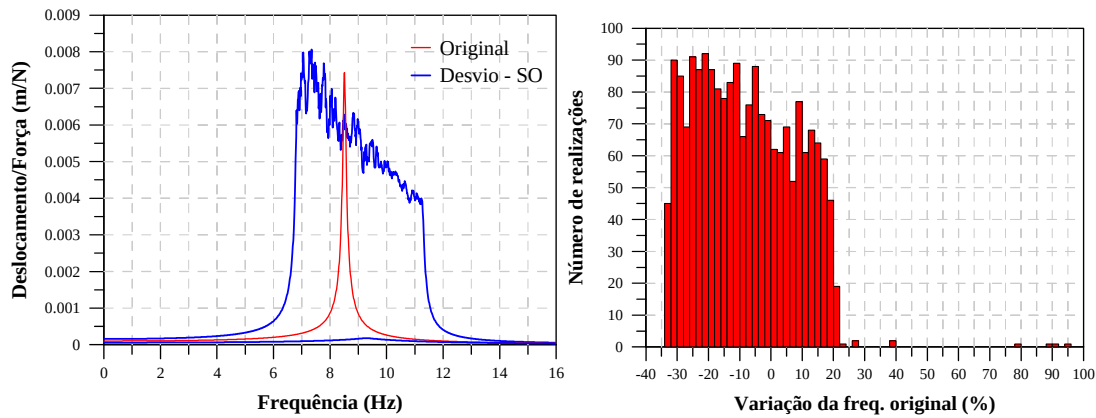
Para as análises considerando incertezas, foi utilizada a situação em que são acrescentados 2 sistemas de amortecimento na estrutura.

Com o intuito de avaliar o impacto das incertezas na qualidade/eficiência do projeto, as análises são feitas a partir de um fator de eficiência η definido como segue:

$$\eta(\psi, \theta) = \frac{A(\psi, \theta)}{A_{\text{Ótima}}(\psi)} \quad (4)$$

Com relação às incertezas, para um análise preliminar considera-se que E e K_a , são variáveis aleatórias independentes com distribuição uniforme, ou seja $E \sim u(E_0, E_F)$ e $K_a \sim u(K_{a0}, K_{aF})$. Os parâmetros E_0, E_F e K_{a0}, K_{aF} são escolhidos de tal forma que a razão $\frac{\omega_{\text{absorção}}}{\omega_{\text{original}}} \in [3/4, 5/4]$.

A Figura 4 mostra a FRF e a variação da frequência original devido ao desvio imposto na estrutura principal.

**Figura 4. FRF e a variação da frequência original devido aos desvios**

Pode ser observado que as amplitudes reduzem com o aumento da frequência e a variação da frequência para esta relação analisada fica em torno de 40% do valor original.

Foi realizada uma análise de convergência de forma a se obter um número adequado de simulações de Monte Carlo. A Figura 5 mostra a estabilização dos valores para 2000 realizações.

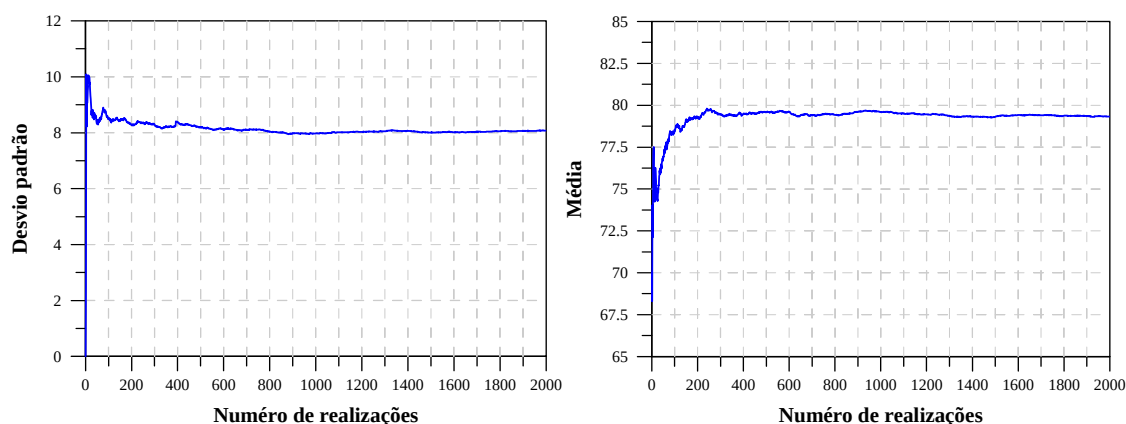


Figura 5. Média e Desvio da eficiência para 2000 realizações

Considerando as incertezas nos sistemas foram analisados 2 casos:

- Caso 1: Desvios somente na Estrutura principal.
- Caso 2: Desvios somente no Sistema de absorção.

5.1 Caso 1

A Figura 6 apresenta a FRF da ‘Estrutura + 2 Sistemas de Absorção’ com desvios somente na estrutura principal.

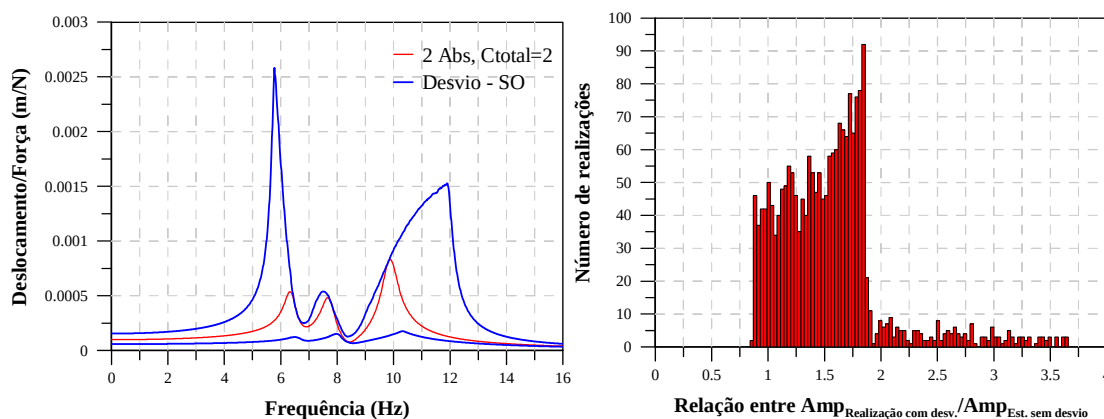


Figura 6. FRF da ‘Estrutura + 2 Sistemas de absorção’ com desvios na estrutura principal e a relação entre o a amplitude do sistema com desvio e sem desvio.

Ao acrescentar incertezas na estrutura original as amplitudes do sistema total podem aumentar em até 4 vezes aproximadamente, reduzindo desta maneira a sua eficiência

5.2 Caso 2

A Figura 7 apresenta a FRF da ‘Estrutura + 2 Sistemas de Absorção’ com desvios somente na estrutura secundária.

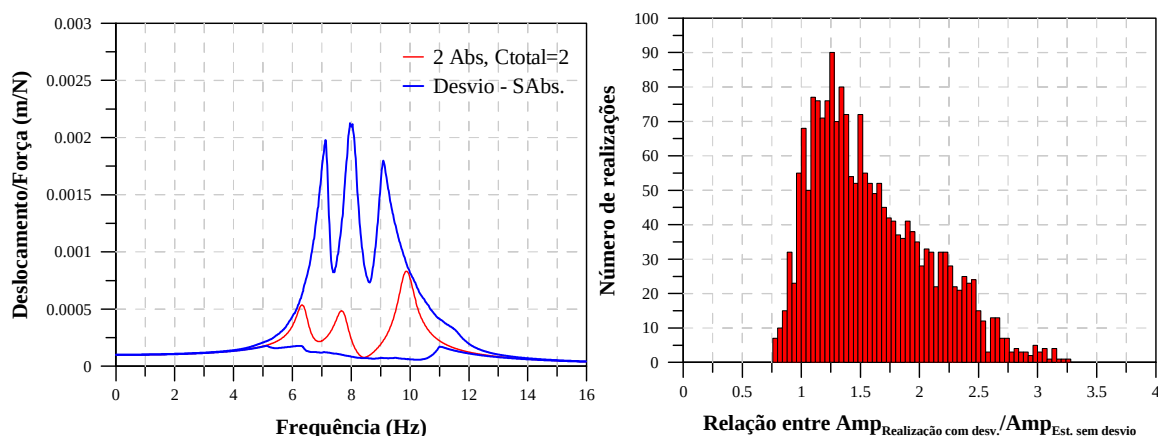


Figura 7. FRF da ‘Estrutura + 2 Sistemas de absorção’ com desvios na Sistema de absorção e a relação entre o a amplitude do sistema com desvio e sem desvio.

Foi observado a semelhança ao caso 1, ao acrescentar incertezas no dispositivo as amplitudes do sistema total podem aumentar em até 4 vezes aproximadamente, reduzindo desta maneira a sua eficiência.

6 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste artigo, foi analisado o impacto das incertezas em projetos com sistemas passivos de absorção acoplados. Como propagação das incertezas foram realizadas 2000 realizações de Monte Carlo, para um valor variando em torno de 25% da relação de frequência. O algoritmo de otimização PSO foi utilizado para encontrar o parâmetro ideal de rigidez do sistema de absorção.

Os resultados mostram a importancia em considerar incertezas no projeto, uma vez que as amplitudes de deslocamento podem aumentar significativamente, reduzindo assim a eficiência do sistema de absorção.

REFERÊNCIAS

- Clough, R. W., Penzien J., 1996. Dynamics of Structures. McGraw-Hill, New York, USA,
- Den Hartog, J. P., 1956. Mechanical Vibrations, McGraw-Hill Co., New York, 1956.
- Jangid, R. S., 1999. Optimum multiple tuned mass dampers for base-excited undamped system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 28, n. 9, pp. 1041–1049.
- Kennerdy, J. Eberhart, J. 1996 – Particle Swarm Optimization, Vol.4, pp. 1942-1948
- Kiranyaz ,S., Ince T., Gabbouj M., 2014. Multidimensional particle swarm optimization for machine learning and pattern recognition. Edited by Conference on Neural Networks. vol. 4. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Lenzen, K. H., 1966. Vibration of Steel Joist – Concrete Slabs Floors. *Engineering Journal of American Institute of Steel Construction*, v. 3, n. 3, pp. 133 – 136, 1966.

Magluta, C.,1993. *Sistemas Dinâmicos Passivos para Absorção de Vibrações Estruturais*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Moreno, C.P., Thomson, P., 2010. Design of an optimal tuned mass damper for a system with parametric uncertainty, *Springer Science*.

Mrabet, E., Guedri, M., Ichchou, M., Ghanmi., 2015a. Stochastic structural and reliability based optimization of tuned mass damper, *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 437-451.

Mrabet, E., Guedri, M., Ichchou, M., Ghanmi., 2015b. New approaches in reliability based optimization of tuned mass damper in presence of uncertain bounded parameters, *Journal of Sound and Vibration*, pp. 93–116.

Schuëller, G.I., Jensen, H.A., 2008. Computational methods in optimization considering uncertainties – an overview, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* vol.198 , pp.2–13.

Pereira, L. A. S., 2016. *Análise dinâmica de edifícios submetidos a excitação de base*. Dissertação de mestrado. Coppe/UFRJ, Brasil

Torres, D. R., 2010. *Reduções de Vibrações utilizando Múltiplos Sistemas Passivos de Absorção*. Dissertação de mestrado. Coppe/UFRJ, Brasil

Venanzi,I., 2015. Robust optimal design of tuned mass dampers for tall buildings with uncertain parameters, *Struct Multidisc Optim*, vol.51,pp.239–250