



THE IMPACT OF UNCERTAIN STRUCTURAL PARAMETERS ON THE EFFECTIVENESS OF TUNED MASS DAMPERS (TMD)

Mariana Miglio 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. Tuned mass dampers (TMD) may be optimally designed to minimize vibrations in engineering structures. The most suitable parameters for a TMD may be sought by means of the solution of an optimization problem according to a pool of quality metrics. In its simplest approach, the optimization problem assumes that the physical parameters of the main structure are exactly known. Nevertheless, the performance of a TMD is sensitive to deviations of the structural parameters which, by the way, are usually uncertain as a result of their fabrication process and also due to changes in operation scenarios. This paper analyzes the impact of uncertain model parameters on the efficiency of the total system when the sources of uncertainty come from both the original structure and the TMD. The optimal parameters of the TMD were estimated by means of the particle swarm optimization (PSO) algorithm. The classical Monte-Carlo simulation was used to estimate the impact of model uncertainties on the TMD effectiveness.

Keywords: *Tuned mass dampers, Monte Carlo Simulation, Uncertainty quantification.*

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,
November 5-8, 2017.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de controle passivo (TMD) são bastante utilizados devido a sua simplicidade de projeto e execução, seu baixo custo de instalação e, quando calibrado corretamente, sua eficiência é extremamente alta. Em contrapartida, este sistema é limitado à faixa de frequência em que atua, além de apresentar sensibilidade a variações dos parâmetros em relação a incertezas quanto ao comportamento dinâmico do sistema estrutural. Desta forma, a calibração adequada dos absorsores é imprescindível para a eficiência do projeto.

Incertezas nos parâmetros estruturais podem ter igual ou até maior influência sobre a resposta do sistema quando comparado com a influência devido à incerteza na excitação (Marano et al., 2010). Considerando a sensibilidade do sistema de absorção e a variação da frequência natural da estrutura principal, torna-se indispensável a análise das incertezas existentes para se obter um bom projeto deste sistema adicionado a estrutura.

Segundo Yang et al. (2015), pequenos desvios na rigidez ótima do sistema de absorção podem reduzir significativamente a eficiência deste dispositivo. Logo, a aplicação de procedimentos de projeto que consideram incertezas garante que o sistema analisado funcionará dentro das margens prescritas com uma certa confiabilidade (Schuller & Jensen, 2008).

Neste contexto, para a construção de projetos ótimos deve ser utilizada uma metodologia de busca de soluções que não sejam muito sensíveis às incertezas dos parâmetros e, ao mesmo tempo, proporcione um desempenho satisfatório do sistema estrutural (Beyer & Sendhoff, 2007).

A estimativa da incerteza em projetos estruturais é um tema ainda não consolidado na literatura, sendo a abordagem probabilística, a mais completa (Crespo & Kenny, 2005; Marano et al., 2008). Dentre os métodos utilizados para simular o comportamento estocásticos do sistema, a simulação de Monte Carlo é bastante usual (Pourzeynali et al., 2013; Venanzi, 2015; Robert & Casella, 2004).

Nos últimos 20 anos, métodos não determinísticos foram desenvolvidos com o intuito de obter projetos otimizados considerando parâmetros e excitações associadas com incertas. Estes métodos podem ser classificados segundo Zang et al (2005) e Marano et al. (2008) em duas abordagens. A primeira corresponde aos métodos de confiabilidade, os quais são utilizados principalmente para análise de risco, calculando a probabilidade da falha (Zang et al, 2005). A segunda abordagem é o projeto ótimo robusto (Venanzi, 2015) no qual busca-se otimizar índices de desempenho levando-se em conta o valor médio e a variância destes. A solução final é menos sensível à variação dos parâmetros. Nessa perspectiva, torna-se possível verificar a relevância em desenvolver projetos de sistemas passivos considerando incertezas nos parâmetros envolvidos.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o impacto dos parâmetros estruturais incertos sobre a eficiência de projetos utilizando sistemas passivos de absorção. As avaliações da eficiência são baseadas em uma métrica de deslocamento relativo que está associada ao pior cenário do projeto. As análises neste trabalho consideram tanto um único TMD quanto múltiplos TMDs (MTMDs). O impacto das incertezas na eficiência do projeto é calculado utilizando o método clássico de simulação de Monte Carlo.

2 MODELO COMPUTACIONAL

As equações governantes de um sistema composto por uma estrutura principal com múltiplos sistemas acoplados podem ser vistas no livro de referência Clough and Penzien (1996). Ao considerar uma estrutura principal com um único sistema (TMD) ou múltiplos sistemas de absorção (MTMDs) a matriz de amortecimento do sistema completo torna-se não proporcional. Portanto, a análise modal do modelo computacional pode ser abordada pelo uso da formulação do espaço de estado que é apresentada a seguir.

A equação governante de um sistema com n graus de liberdade (GL) é dada por:

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

$\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ - Matrizes de massa, amortecimento e rigidez respectivamente de dimensões $n \times n$.

$\ddot{\mathbf{x}}$, $\dot{\mathbf{x}}$, $\mathbf{x}$ and $\mathbf{F}$ - Vetores de deslocamento, velocidade, aceleração e de força respectivamente de $n \times 1$.

Como a matriz de amortecimento $\mathbf{C}$ é não proporcional a matriz de massa e rigidez, para trabalhar com as propriedades modais do sistema, deve-se reorganizar as equações governantes usando uma abordagem do espaço de estado. Em primeiro lugar, consideremos a mudança de variáveis da seguinte forma:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{bmatrix}_{(2n \times 1)} \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \ddot{\mathbf{x}} \end{bmatrix}_{(2n \times 1)} \quad (3)$$

Considerando as condições de vibração livre a Eq. (1) é reescrita da seguinte maneira:

$$[\mathbf{C} \ \mathbf{M}]_{(n \times 2n)} \dot{\mathbf{v}}_{(2n \times 1)} + [\mathbf{K} \ \mathbf{0}]_{(n \times 2n)} \mathbf{v}_{(2n \times 1)} = \mathbf{0} \quad (4)$$

Para obter um sistema com equações $2n$, utiliza-se a identidade mostrada na Eq. (5)

$$[\mathbf{M}; \mathbf{0}]_{(N \times 2N)} \dot{\mathbf{v}}_{(2N \times 1)} + [\mathbf{0}; -\mathbf{M}]_{(N \times 2N)} \mathbf{v}_{(2N \times 1)} = \mathbf{0} \quad (5)$$

Considerando as condições de vibração livre, as equações governantes são dadas a seguir:

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{B}\mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (6)$$

Onde:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \text{ and } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M} \end{bmatrix}$$

A solução da Eq. (6) pode ser escrita como:

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\phi} e^{\lambda t} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \lambda \boldsymbol{\phi} e^{\lambda t} \quad (8)$$

Substituindo as Eqs. (7) e (8) na Eq. (6) tem-se problema de autovalor com autovalores e autovetores na forma complexa.

$$(\mathbf{A}\lambda_r + \mathbf{B})\boldsymbol{\phi}_r = 0 \quad (9)$$

$$\lambda_r = -\xi_r \overline{\omega_r} + \overline{\omega_r} \sqrt{1 - \xi_r^2} \quad i, \quad r = 1, 2, \dots, 2n \quad (10)$$

Onde $i = \sqrt{-1}$ é o número imaginário. A Solução da Eq. (9) tem 2n autovetores e autovalores.

Com o objetivo de minimizar os níveis de vibração da estrutura principal MTMDs são acoplados. Cada sistema é modelado como um único grau de liberdade conectado ao grau de liberdade vertical da estrutura principal. Portanto, se o modelo computacional da estrutura principal/original contém n GLs, o modelo computacional da estrutura principal com m sistemas acoplados tem n+m GLs.

Mais detalhes sobre as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do modelo estrutural podem ser encontrados no livro de referência Clough and Penzien (1996).

3 EFICIÊNCIA

Neste item, destaca-se a importância de definir algum critério que permita comparações de desempenho de diversos projetos de um unico sistema (TMD) e multiplos sistemas (MTMDs). Os autores propõem trabalhar com o pior cenário definido a seguir. Supondo que a excitação do sistema seja periódica, o pior cenário corresponde a uma frequência de excitação igual à frequência em que o FRF atinge o máximo deslocamento. Além disso, como a eficiência do projeto do sistema deve ser calculada usando informações da estrutura original / principal na frequência alvo, o pior cenário é caracterizado pela variável η da seguinte forma:

$$\eta = \left(1 - \frac{\max\{|H_T(\omega)|\}}{H_{max}} \right) \times 100 \% \quad (11)$$

onde H_{max} corresponde ao valor máximo da FRF da estrutura original/principal dentro da faixa de interesse.

$$H_{max} = \max_{\omega \in [\omega_i, \omega_f]} \|H_o(\omega)\| \quad (12)$$

$[\omega_i, \omega_f]$ É uma banda de frequência definida pelo usuário que está em torno da frequência principal e $H_T(\omega)$ corresponde a FRF da estrutura principal/original com os MTMDs acoplados. Além disso, para algumas análises, é interessante levar em conta a informação contida em toda a faixa de interesse $[\omega_i, \omega_f]$ para esses casos, pode-se trabalhar com o deslocamento relativo que é computado em cada frequência ω da seguinte forma:

$$\text{Deslocamento Relativo } DR(\omega) = \frac{H_T(\omega)}{H_{max}} \quad (13)$$

A utilidade do RD (ω) e a eficácia calculada no pior cenário η tornarão claras quando se considera incertezas do modelo.

4 ANÁLISES E RESULTADOS

As análises a seguir serão realizadas utilizando-se um modelo computacional que descreve um sistema estrutural montado no LABEST. Este sistema corresponde a uma viga metálica bi-apoiada, de seção reta (3" x 5/16"), com comprimento de aproximadamente 1.5 m, ilustrada na Fig.1.



Figura 1. Viga com 1 Sistema de Absorção acoplado no meio do vão (MAGLUTA, 1993).

O modelo computacional foi desenvolvido utilizando o método de elementos finitos em Matlab. O sistema estrutural mostrado na Fig. 1 é composto por uma viga com um único TMD acoplado no meio do vão. Os parâmetros do TMD $\{m_T, k_T, c_T\}$ foram calibrados com o objetivo de controlar o primeiro modo de vibração conforme descrito por Magluta (1993). Os parâmetros deste dispositivo são: $m_T=0.5\text{Kg}$, $k_T=1295\text{N/m}$ e $c_T=2.0\text{N.s/m}$; consequentemente, a taxa de amortecimento (ξ_T) é 4 %.

A instalação de m TMDs na estrutura principal implica em um sistema total com m modos de vibração adicionais quando comparado ao sistema principal. Quando estes TMDs são calibrados para reduzir o deslocamento de um determinado modo de vibração, o sistema apresenta modos ($m + 1$) em torno desta frequência em análise. Portanto, como o sistema mostrado na Fig. 1 possui um único TMD acoplado, esta estrutura apresenta dois modos de vibração em torno do primeiro modo da estrutura principal / original. Estes dois modos são apresentados na Tabela 1 e são denominados modo 1a e modo 1b. Além disso, a Tabela 1 apresenta comparações entre os resultados numéricos e experimentais.

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

A seguir serão realizadas análises considerando também MTMDs acoplados a estrutura principal com o objetivo de reduzir o primeiro modo e, será analisado também o impacto das incertezas na eficiência do projeto com um TMD e com MTMDs. As análises serão realizadas em três etapas: (i) Estimativa dos parâmetros ótimos de um único TMD através um algoritmo de otimização. (ii) Estimativa dos parâmetros ótimos dos MTMD. (iii) Analisar o impacto das incertezas dos parâmetros na eficiência do projeto. Este último passo considera um único e múltiplos sistemas de absorção.

Na primeira etapa (i), o algoritmo Particle Swarm (PSO) foi usado para calibrar um único TMD ajustando sua rigidez (k_T) e assumindo que $m_T=0.5\text{Kg}$, $\xi_T = 4\%$.

A Fig. 2 apresenta o deslocamento relativo para este projeto (1TMD-PSO) e para o projeto com o dados experimentais desta configuração (1TMD). A Fig. 2 também apresenta o deslocamento relativo da estrutura contendo 5 TMDs acoplados no meio do vão. Estes 5 TMDs foram calibrados com base nos parâmetros obtidos através da otimização com PSO (1 TDM - PSO) definidos como:

$$m_r = \frac{m_T}{5}; k_r = \frac{k_T}{5}; \xi_r = \xi_T \quad r = 1, 2, \dots, 5$$

onde m_r e k_r são a massa e a rigidez respectivamente referente aos TMDs. Para esta situação m_T e k_T são a massa e a rigidez do modelo denominado 1TMD-PSO.

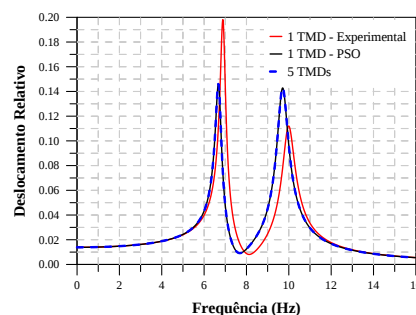


Figura 2. Comparação entre um único TMD (Experimenta e PSO) e MTMDs.

Pode-se observar que o projeto com 1TDM - PSO apresenta maior redução na resposta quando comparado com 1TDM-Exp., em torno de 6Hz; No entanto, sua eficiência em torno de 10Hz é menor em relação ao 1TDM-Exp., como o deslocamento relativo de 1TDM-Exp é baseado em dados experimentais, considera-se importante incluir incertezas nesta análise. Finalmente, observou-se que a adoção de 5 TMDs posicionados no meio do vão não melhora a eficiência do projeto. Isso ratifica a necessidade de uma estratégia de otimização para calibrar os parâmetros de cada um dos TMDs.

Para melhorar a eficiência da estrutura com MTDMs, Jangid (1999) afirma que as frequências naturais dos sistemas de absorção devem ser uniformemente distribuídas em torno da frequência média. O objetivo principal desta estratégia é obter um perfil mais homogêneo de deslocamento no domínio da frequência dentro de uma faixa específica de interesse $[\omega_i, \omega_f]$. A idéia de um perfil homogêneo na FRF é ilustrada na Fig. 3. O objetivo principal

agora é determinar os parâmetros do TMD de modo que o $\max\{|H_T(\omega)|\}$ seja minimizado e $|H_T(\omega)|$ seja o mais homogêneo dentro da banda de interesse $[\omega_i, \omega_f]$.

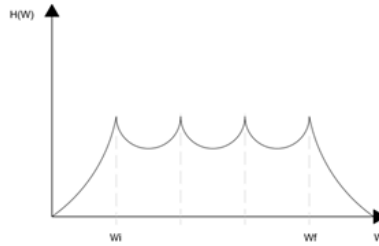


Figura 3. FRF ilustrativa da estrutura principal / original com 3 TMDs acoplados.

A calibração da frequência dos MTDMs ocorre através da razão de frequência (γ_r) definida a seguir:

$$\gamma_r = \gamma + (r - 3)\Delta \quad r=1,2,\dots,5 \quad (14)$$

Onde γ corresponde a razão de frequência do modelo 1TMD-PSO, $\gamma_r = \frac{\omega_{Tr}}{\omega_o}$ corresponde à razão de frequência de r TMDs, ω_{Tr} corresponde a frequência natural de r TMDs e ω_o corresponde a frequência natural do sistema principal, ou seja, a frequência a ser reduzida. Finalmente, Δ é um coeficiente definido pelo usuário que pode ser escolhido corretamente para gerar variações específicas da relação de frequência, como mostrado a seguir.

Na segunda etapa (ii), com o objetivo de analisar o comportamento da estrutura com MTDMs, foram considerados três casos, para cada caso foi determinado um valor diferente de Δ (Caso1: $\Delta=5\%$, Caso 2: $\Delta=10\%$ e Caso 3: $\Delta=12.5\%$). O ajuste da frequência pode ser realizado através da alteração da massa ou rigidez, neste trabalho foi considerado ambas situações: (a) todos os sistemas possuem a mesma massa e, (b) todos os sistemas possuem a mesma rigidez. O comportamento da estrutura em ambas situações foram comparadas com o modelo de 1TMD-PSO ($\Delta=0$), como mostrado na Fig. 4.

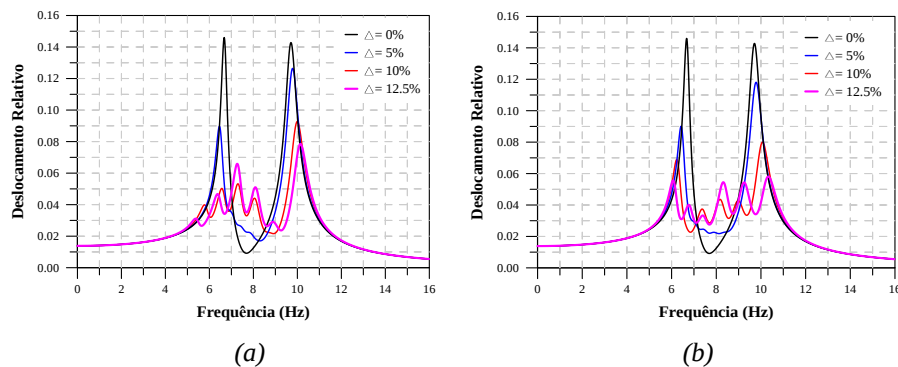


Figura 4. Estrutura principal com 5 sistemas acoplados: Todos os TMDs apresentam (a) a mesma massa e, (b) mesma rigidez.

Pode-se concluir na Fig. 4 que, devido ao aumento do coeficiente de variação (Δ) as amplitudes do sistema tornaram-se mais homogêneas quando comparadas ao modelo de 1TMD-PSO. Isto é particularmente observado quando a calibração é realizada mantendo a rigidez fixa de todos os MTDMs, conforme observado na Fig. 4 (b). Em particular,

considerando $\Delta = 12,5\%$ obtém-se o melhor desempenho do MTMD para a situação (b) como mostrado na Fig. 4 (b). Vale ressaltar que, o comportamento da estrutura é sensível às variações no sistema principal / original e às variações dos parâmetros de cada TMD que podem ocorrer, por exemplo, devido aos processos de fabricação.

As incertezas nos parâmetros estruturais são muitas vezes ignoradas no projeto (Park et.al., 2004). No entanto, existem algumas situações nas quais essas incertezas não podem ser ignoradas devido ao fato de o comportamento da estrutura ser bastante sensível a estes desvios, portanto, considerar as incertezas dos parâmetros ao calibrar os sistemas de absorção conduzem a projetos mais robustos. A rigidez estrutural é uma fonte de incerteza, mas geralmente é considerada como um parâmetro determinístico. Esta suposição negligencia suas variações em relação ao projeto. Neste contexto, a terceira etapa das análises (iii) assume como parâmetros incertos: o módulo de elasticidade (E) da estrutura principal / original e o parâmetro de rigidez (k_r) de cada uma dos TMDs, $r = 1, 2, \dots, m$.

Neste trabalho, as incertezas dos parâmetros são modeladas usando a teoria da probabilidade. Os níveis / características de incerteza são descritos por meio de funções de densidade de probabilidade (PDF). O processo de construção destas PDFs baseia-se em informações do fabricantes, laboratórios ou mesmo considerando dados não informativos. Foi utilizada a simulação clássica de Monte-Carlo para estimar o impacto das incertezas na eficiência do TMD. Após algumas análises de convergência, observou-se que 2000 simulações foram satisfatórias para nossos propósitos.

Os parâmetros $\{E, k_1, \dots, k_m\}$ são assumidos como variáveis aleatórias independentes. Para alguns cenários, pode-se considerar que um parâmetro do conjunto $\{E, k_1, \dots, k_m\}$ é determinístico e a PDF é modelada usando a distribuição delta de Dirac. Por outro lado, se um parâmetro do conjunto $\{E, k_1, \dots, k_m\}$ não for determinístico, sua PDF é modelada como uma PDF gaussiana truncada. Essas PDFs são construídas de modo que as razões de frequência satisfaçam $\gamma_r \in [0.9, 1.1]$, $r = 1, 2, \dots, m$.

A eficiência e a variação da resposta estrutural devido a parâmetros incertos do modelo serão analisados em seguida para os projetos com um único TMD e com 5 TMDs. Foram considerados três casos: Caso 1: Incertezas na estrutura principal / original, Caso 2: Incertezas nos TMDs e Caso 3: Incertezas nos TMDs e incertezas na estrutura principal. Os resultados são mostrados nas Figs. 5 a 10. O melhor comportamento do deslocamento relativo e o envelope estocástico (99%) correspondente são mostrados à esquerda. O histograma da eficiência η , que descreve o pior caso, é mostrado à direita.

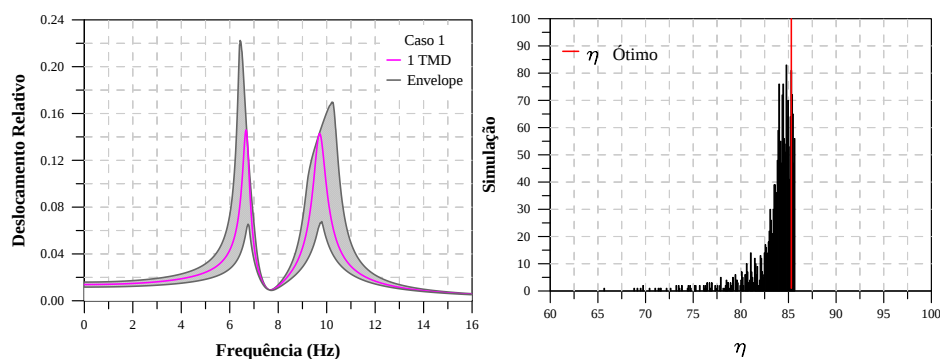


Figura 5. Caso 1: 1 TMD. Incertezas na estrutura principal. À esquerda: o melhor comportamento e o envelope estocástico do DR (99%). À direita: histograma da eficiência η (pior caso).

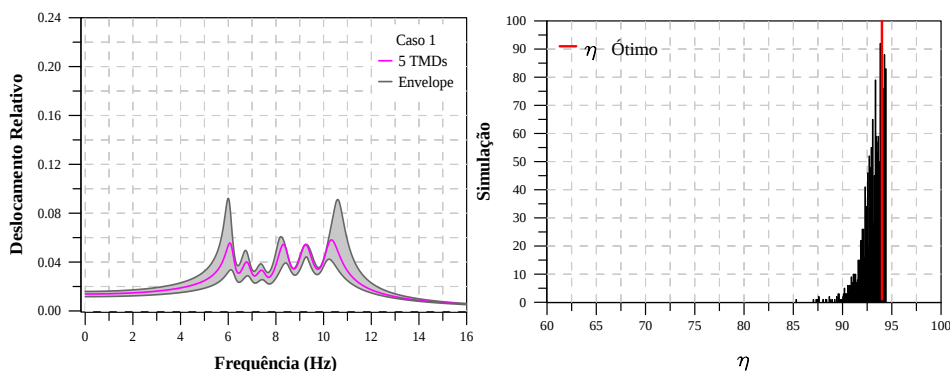


Figura 6. Caso 1: 5 TMDs. Incertezas na estrutura principal. À esquerda: o melhor comportamento e o envelope estocástico do DR (99%). À direita: histograma da eficiência η (pior caso).

Quanto às incertezas na estrutura principal / original, a partir da Fig. 5 e Fig. 6 pode-se concluir que a eficiência está dentro de 92-94% para o projeto com 5 TMDs e está dentro de 80-87% para o projeto com um único TMD. Além disso, embora em poucas simulações, o histograma mostrado na Fig. 5 indica a presença de $\eta < 70\%$ para o design de 1 TMD.

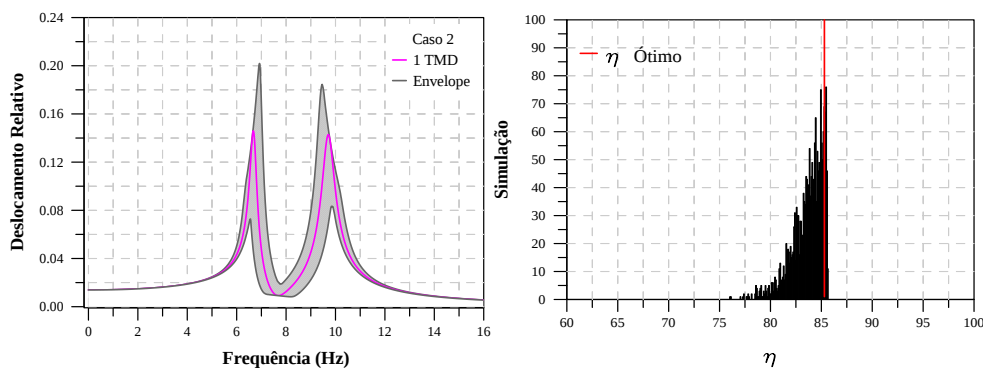


Figura 7. Caso 2: 1 TMD. Incertezas no TMDs. À esquerda: o melhor comportamento e o envelope estocástico do DR (99%). À direita: histograma da eficiência η (pior caso).

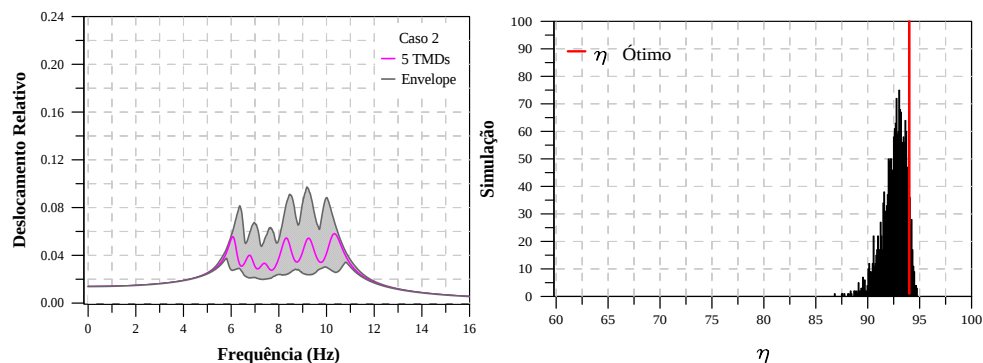


Figura 8. Caso 2: 5 TMDs. Incertezas no TMDs. À esquerda: o melhor comportamento e o envelope estocástico do DR (99%). À direita: histograma da eficiência η (pior caso).

Quanto às incertezas nos TMDs, a partir da Fig. 7 e da Fig. 8, pode-se observar um comportamento semelhante ao observado nas Figs. 5 e 6. De fato, uma análise mais cuidadosa

com base na eficiência η (1TMD) indica a ocorrências de realizações para as quais a eficiência é inferior a 78%.

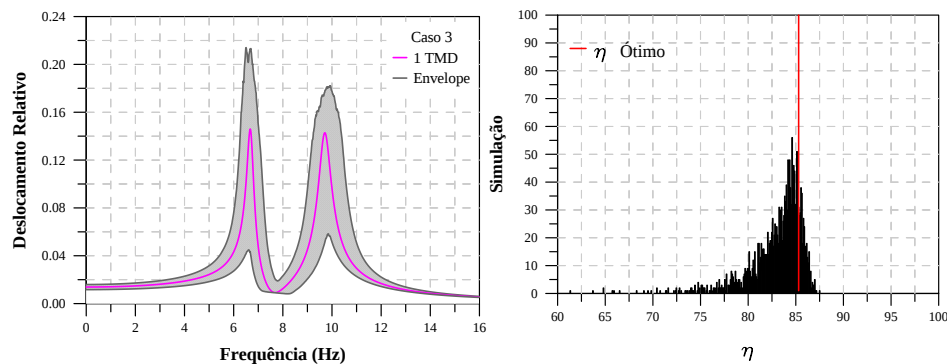


Figura 9. Caso 3: 1TMD. Incertezas no TMDs. À esquerda: o melhor comportamento e o envelope estocástico do DR (99%). À direita: histograma da eficiência η (pior caso).

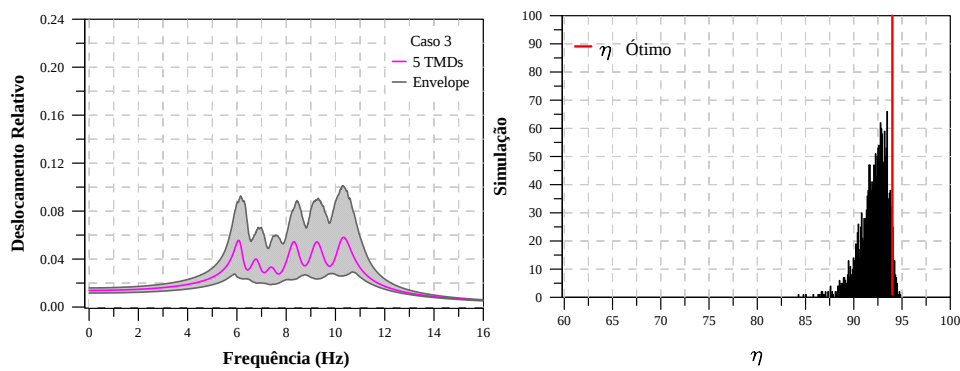


Figura 10. Caso 3: 5 TMDs. Incertezas no TMDs. À esquerda: o melhor comportamento e o envelope estocástico do DR (99%). À direita: histograma da eficiência η (pior caso).

Quanto às incertezas nos sistemas de absorção e na estrutura principal simultaneamente, a partir da Fig. 9 e da Fig. 10 pode-se observar um comportamento semelhante ao observado nas Figs. 6 e 7. De fato, uma análise mais cuidadosa baseada na eficiência η (1TMD) indica as ocorrências de um pequeno número de realizações para as quais a eficiência é de aproximadamente 60%.

Devido ao fato de que as Figs. 5,6,7,8,9 e 10 possuem muitas informações que devem ser comparadas de alguma forma, o gráfico boxplot mostrado na Fig. 11 apresenta o resumo de três casos apresentados anteriormente, para 1 e 5 TMDs apresentando o valor médio, os quartis e os eventos raros (em vermelhos).

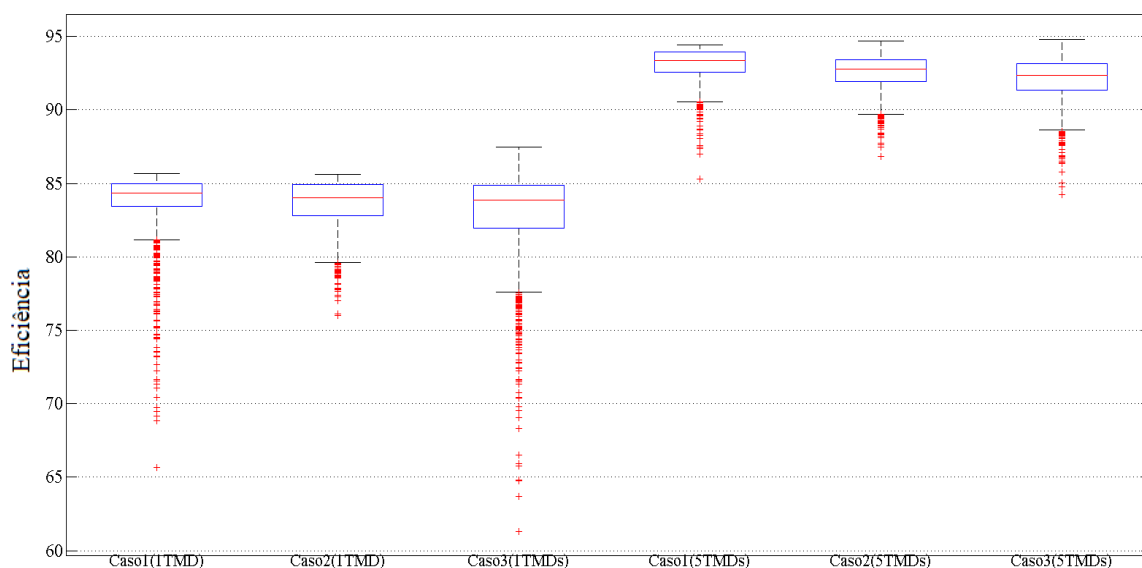


Figura 11. Resumo do impacto das incertezas de cada parâmetro na resposta do sistema estrutural.

Para os casos analisados, a Fig. 11 indica que os projetos com múltiplos TMDs apresentam melhores desempenhos do que os que consideram apenas um único TMD quando os valores de eficiência (η) são usados como referência. Por outro lado, uma análise mais completa deve levar em consideração o valor esperado de η . Os autores acreditam que todos esses três itens juntos com uma técnica para análise de sensibilidade global seriam bastante úteis em um projeto robusto do TMD.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisa o impacto que os parâmetros de rigidez considerados como incertos têm na eficiência do sistema de absorção. Uma comparação entre um único TMD e múltiplos TMDs (MTMDs) foi proposta para entender o comportamento de diferentes projetos em relação à robustez estrutural.

Nos casos analisados neste trabalho os Projetos com MTMDs apresentaram desempenho superior quando comparados aos projetos com um único TMD. No que diz respeito às realizações com a menor eficiência, os projetos com MTMD também apresentaram desempenho superior quando comparados aos projetos com um único TMD. Foi verificado a necessidade de medir a diminuição e a propagação da eficiência simultaneamente. Isso pode ser possivelmente realizado por meio da Análise de Sensibilidade Global na qual pode fornecer informações valiosas tanto para alcançar a robustez do projeto quanto para tomar decisões importantes.

Finalmente, também deve ser considerado outras fontes de incertezas nas análises, como excitação e condições de contorno.

REFERÊNCIAS

Beyer, H. G., Sendhoff, B., 2007. “Robustness optimization — a comprehensive survey”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol.196, pp.3190–3218.

- Crespo, L. G., Kenny, S. P., 2005. “Robust Control Design for systems with probabilistic uncertainty”. *NASA Report*, TP-2005-213531.
- Clough, R. W., Penzien J., 1996. *Dynamics of Structure*. McGraw-Hill, New York, USA,
- 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.
- Magluta, C., 1993. *Sistemas Dinâmicos Passivos para Absorção de Vibrações Estruturais*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Marano, C. G., Sgobba, S., Mezzina, M., 2008. “Robust optimum design of tuned mass dampers devices in random vibrations mitigation” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 313, pp.472–492.
- Marano, G. C., Graco, R., Sgobba, S., 2010. “A comparison between different robust optimum design approaches: Application to tuned mass dampers” *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol.25, pp.108–118.
- Park, K., Koh, H. Hahm, D., 2004. “Integrated optimum design of viscoelastically damped structural systems.” *Engineering Structures*, 26, 581–591.
- Pourzeynali, S., Salimi, S., Eimani Kalesar, H., 2013. “Robust multi-objective optimization design of TMD control device to reduce tall building responses against earthquake excitations using genetic algorithms”, *Scientia Iranica A*, vol. 20 n.2, pp.207–221.
- Robert, C., Casella, G., 2004. *Monte Carlo Statistical Methods*, Springer, USA.
- 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.
- Venanzi, I., 2015. Robust optimal design of tuned mass dampers for tall buildings with uncertain parameters, *Struct Multidisc Optim*, vol.51, pp.239–250
- Zang, C., Frisewell M. I., Mottershead J.E., 2005. “A review of robust optimal design and its application in dynamics”, *Computers and Structures*, vol.83, pp.315–326.
- Yang, F, Sedaghati, R., Esmailzadeh, E., 2015. Optimal design of distributed tuned mass dampers for passive vibration control of structures, *Structural Control Health Monitoring*, v. 22, pp.221–236.