

PROJETO DE UM ABSORVEDOR DINÂMICO PIEZELÉTRICO PARA ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES E GERAÇÃO DE ENERGIA

Karina Mayumi Tsuruta, Laboratório de Mecânica e Estruturas, karina@mecanica.ufu.br
Domingos Alves Rade, Laboratório de Mecânica e Estruturas, domingos@ufu.br

Resumo. Atualmente, a indústria mecânica, civil e aeronáutica tem utilizado estruturas cada vez mais esbeltas e leves, favorecendo ao aumento dos níveis das amplitudes de vibração destes componentes. Este aumento pode causar danos em estruturas e equipamentos, além de desconforto e dor em seres humanos. E uma das soluções encontradas para minimizar estes níveis de vibração é a utilização de absorvedores dinâmicos de vibração (ADV). Estes dispositivos são formados por parâmetros concentrados de massa, rigidez e amortecimento, e possuem a capacidade de minimizar as amplitudes de vibrações, uma vez acopladas a estrutura primária. Nos trabalhos relacionados a este assunto, o ADV é sintonizado para mitigar as vibrações do sistema primário excitados em uma frequência harmônica fixa, e caso esta frequência seja alterada, o ADV perde a eficiência. Além disso, podem ser acoplados transdutores piezelétricos ao ADV aumentando o nível de amortecimento da estrutura primária, uma vez que estes são capazes de transformar energia mecânica em energia elétrica. O objetivo deste trabalho é projetar um ADV passivo capaz de minimizar ao máximo as amplitudes de vibração e ainda gerar energia elétrica utilizando transdutores piezelétricos, independente do tipo de excitação da estrutura primária. O ADV projetado será constituído de quatro vigas de alumínio engastada-livre com massas concentradas na ponta livre da viga, e nestas serão acopladas pastilhas piezelétricas poliméricas do tipo ACX. Os parâmetros ótimos do ADV, para a máxima obtenção de amortecimento da estrutura primária e produção de energia, serão obtidos a partir da variação do peso da massa concentrada e do posicionamento desta.

Palavras chave: piezeletricidade, absorvedor dinâmico de vibração, geração de energia, amortecimento.

1. INTRODUÇÃO

A tendência de realização de projetos estruturais de grandes dimensões e peso moderado (elementos flexíveis), do avanço tecnológico de máquinas e equipamentos e dos padrões sanitários mais rigorosos que estabelecem limites restritos para os níveis aceitáveis de vibração e ruído, têm determinado o aumento da preocupação em relação à resolução dos problemas da presença de vibrações na indústria da construção civil, mecânica, naval e aeronáutica, etc. (CUNHA Jr., 2004). Estas vibrações podem resultar em desgaste excessivo e mau funcionamento de equipamentos e estruturas, formação de trincas, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos devido à fratura de juntas soldadas, e em seres humanos pode causar dor, desconforto e redução da eficiência (RAO, 2008).

Atualmente, vários métodos têm sido desenvolvidos para supressão da vibração, podendo ser divididos em dois grandes grupos: os métodos passivos que são processos simples e econômicos, usualmente feitos empregando materiais dissipadores, e os métodos ativos geralmente mais complexos e onerosos, que utilizam atuadores que aplicam forças de controle sobre a estrutura vibratória comandada por computadores digitais. Uma solução intermediária que pode ser utilizada, levando-se em consideração o custo e a eficiência, é o absorvedor dinâmico de vibração (ADV), estes são constituídos por subsistemas do tipo massa-mola-amortecedor que, uma vez acoplados à estrutura da qual se deseja atenuar os níveis de vibrações, absorvem parcial ou totalmente a energia vibratória no ponto de acoplamento (KORENEV e REZNIKOV, 1993).

De acordo com Rade e Steffen Jr.(2000), os parâmetros de um ADV (inércia, rigidez e amortecimento) são sintonizados de modo que minimizem as vibrações da estrutura primária submetidas a uma excitação harmônica em uma frequência fixa. Caso a frequência de excitação modifique, ou algum parâmetro do ADV varie, mesmo que seja pouco, o ADV tende a perder a eficiência. Para minimizar este problema duas soluções são propostas:

- Determinação de um conjunto de parâmetros que garanta amplitudes mínimas de vibração em uma banda de frequência (mais larga possível);

- Conceber adaptadores adaptativos, cujos parâmetros podem ser alterados automaticamente e continuamente para manter a sintonização do ADV. Para isto, podem ser utilizados materiais inteligentes como materiais com memória de forma, piezelétricos, fluídos eletorreológicos.

Os materiais piezelétricos são materiais inteligentes capazes de trabalhar em dois domínios físicos, o mecânico e elétrico. Estes tem a capacidade de transformar diretamente a energia mecânica em energia elétrica e térmica, com isso atenuando os níveis de vibração do sistema ao qual está acoplado e ao mesmo tempo gerar energia elétrica.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um projeto de um absorvedor dinâmico de vibração, e nestes serão acoplados transdutores piezelétricos, buscando-se obter a máxima atenuação da estrutura primária e a máxima geração de energia elétrica. Este ADV é formado por quatro vigas de alumínio do tipo engastada-livre, e em cada destas foi acoplada uma pastilha piezelétrica do tipo MFC (*Micro Fiber Composite*), a variação dos parâmetros do ADV foi obtida variando-se o peso da massa concentrada e o posicionando uma massa concentrada ao longo da viga.

2. TEORIA

2.1. Geração de energia por piezeletricidade

De acordo com Leo (2007), os materiais inteligentes são aqueles que possuem acoplamentos em múltiplos domínios físicos. Um exemplo deste material é o material piezelétrico, este trabalha tanto no domínio mecânico quanto no elétrico, como demonstrado na Fig. 1 (a). Estes materiais quando tensionados mecanicamente, são capazes de gerar uma tensão elétrica (efeito direto) e quando uma tensão elétrica é aplicada no transdutor piezelétrico, este consegue gerar uma deformação mecânica (efeito inverso), este tipo de acoplamento é chamado de eletromecânico.

O mecanismo de geração de energia por piezeletricidade utiliza a capacidade deste material de gerar cargas elétricas quando deformados mecanicamente (efeito direto). A Fig. 1 (b) mostra um resumo das três formas de energia envolvidas nos sistemas de geração de energia piezelétricos, a energia mecânica, energia elétrica e energia térmica. As duas primeiras são ligadas bidirecionalmente ao transdutor piezelétrico. Pelo caminho 1, a energia mecânica é diretamente dissipada. Os caminhos 2 e 3 passam através da “ponte piezelétrica”, convertendo uma parte da energia mecânica em energia elétrica, que é armazenada e ao mesmo tempo, a energia mecânica e elétrica são convertidas em energia térmica pelos elementos de dissipação como amortecedores mecânicos e resistores elétricos (LIANG e LIAO, 2009). E como a energia mecânica é transformada em energia elétrica e térmica, a estrutura ao qual o transdutor piezelétrico está acoplado é amortecida, atenuando os níveis de vibração.

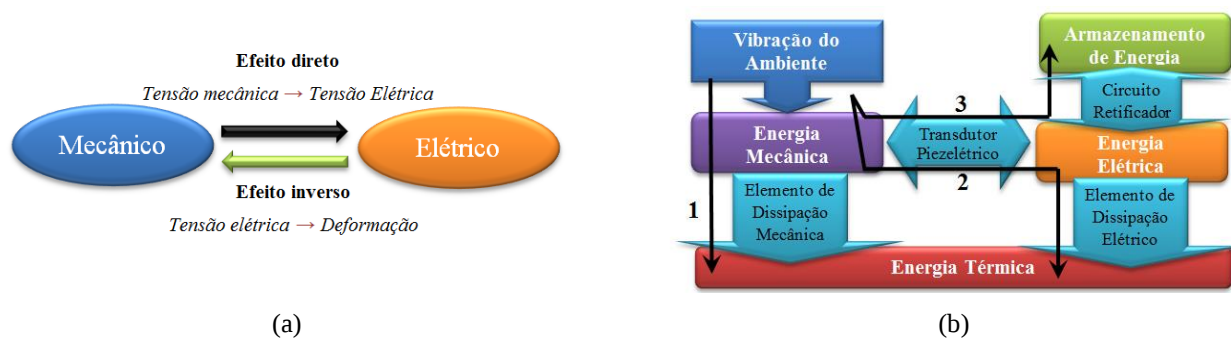


Figura 1. (a) Acoplamento eletromecânico dos materiais piezelétricos; (b) Ilustração dos fluxos de energia (adaptado de LIANG e LIAO, 2009).

Na literatura existem vários trabalhos experimentais e de modelagem numérica sobre a utilização de transdutores piezelétricos para geração de energia visando também o amortecimento das estruturas, como Wang e Inman (2012), Adhikari(2009), De Marqui *et. al* (2009), e outros.

Godoy (2012) utilizou transdutor de material piezelétrico (PZT-5A) conectados a um circuito *shunt* ressonante para melhorar a geração de energia e reduzir as amplitudes de vibração de uma placa de alumínio com as condições de contorno engastada-livre e deslizante-livre, e otimizou a geometria das placas de materiais piezelétricos colados na estrutura visando a redução da quantidade de transdutores. Para isto desenvolveu um modelo de elementos finitos de uma placa laminada piezelétrica combinando a teoria de camada equivalente e deformação de cisalhamento de primeira ordem conectada a um circuito resistor e outro circuito resistor-indutor. Além disso, analisou a inserção do efeito de incertezas para os parâmetros dielétrico e piezelétrico dos transdutores, e da indutância elétrica ligada ao circuito ressonante. Para a placa engastada-livre conectada ao circuito resistivo, o valor da carga da resistência foi 20156Ω e para o circuito resistivo-indutivo, o valor da carga da resistência foi 6890Ω e do indutor de $26,32 \text{ H}$. E para a placa deslizante-livre conectada ao circuito resistivo, o valor da carga da resistência foi 13448Ω e para o circuito resistivo-indutivo, o valor da carga da resistência foi $8357,3 \Omega$ e do indutor de 21 H . Os resultados mostraram que o indutor elétrico no circuito melhora a geração de energia em uma banda de frequência, e que a otimização geométrica pode reduzir a quantidade de material piezelétrico sem diminuir significativamente a quantidade de energia gerada.

2.2. Absorvedores Dinâmicos de Vibração

De acordo com Marques (2000), o absorvedor dinâmico de vibração (ADV) é um dispositivo de parâmetros concentrados de massa, rigidez e amortecimento, que tem como objetivo, uma vez acoplados a um sistema mecânico, atenuar as vibrações deste, pois é capaz de absorver a energia vibratória do ponto ao qual está conectado.

Na Fig. 1(a) é mostrado um sistema de dois graus de liberdade, formado por uma estrutura primária, representada por uma massa (m_1) e uma rigidez (k_1), e um ADV, representado por uma massa (m_2) e uma rigidez (k_2), acoplado a esta estrutura.

Ali e Adhikari (2012) propuseram um absorvedor dinâmico de vibração (ADV) com um transdutor piezelétrico acoplado, tendo como objetivo a atenuação dos níveis de vibração da estrutura primária, e simultaneamente gerar energia elétrica, conforme a Fig. 2 (b). Um método no domínio da frequência foi proposto para análise e projeto de um sistema acoplado eletromecanicamente. Foi utilizada a teoria da aproximação do ponto fixo, proposto por Hartog (1985), esta metodologia utiliza dois pontos fixos em que as amplitudes das frequências da estrutura primária são independentes do amortecimento do ADV. Com isto, foi possível reduzir os parâmetros de otimização apenas para uma banda de frequência, e encontrar e definir o parâmetro ótimo do amortecimento para o ADV. Os resultados obtidos demonstram que ao contrário da ADV clássico, o ADV-Gerador não possui pontos fixos, no entanto a teoria de ponto fixo mostrou-se aplicável para pequenos valores de parâmetros elétricos, e a adição de um gerador de energia piezelétrico ao ADV reduz a exigência de um alto valor de amortecimento do absorvedor.

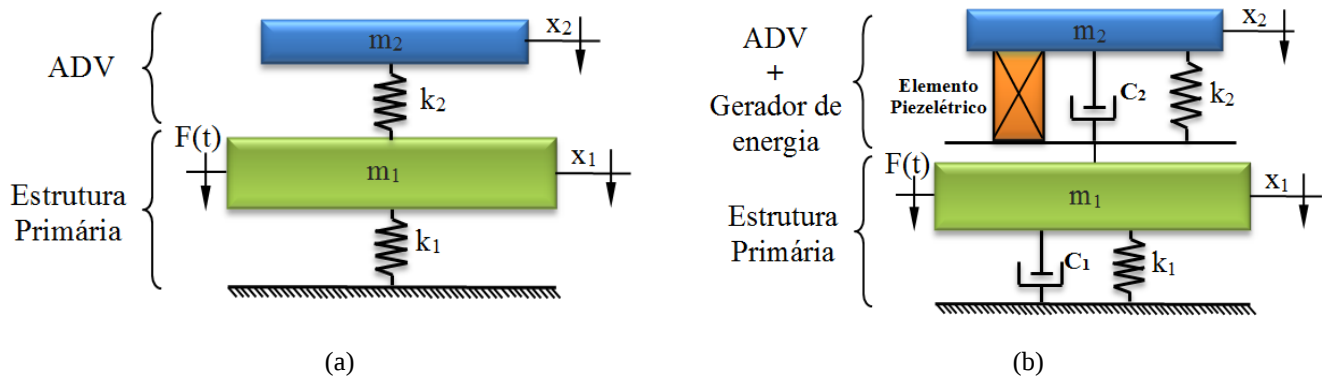


Figura 2. Modelo de uma estrutura primária com ADV não amortecido (CUNHA JR (1999)); Diagrama esquemático de um absorvedor dinâmico de vibração conectado a um sistema de 1GDL (adaptado de ALI e ADHIKARI, 2012).

3. METODOLOGIA

Com o objetivo de atenuar os níveis e vibração de uma estrutura primária robusta e gerar energia foi construído um absorvedor dinâmico de vibração (Fig.3 (a)) formado por quatro vigas de alumínio de espessura de 1,2 mm com uma massa concentrada em suas extremidades livres. As dimensões desta estrutura estão mostradas na Fig. 3(b).

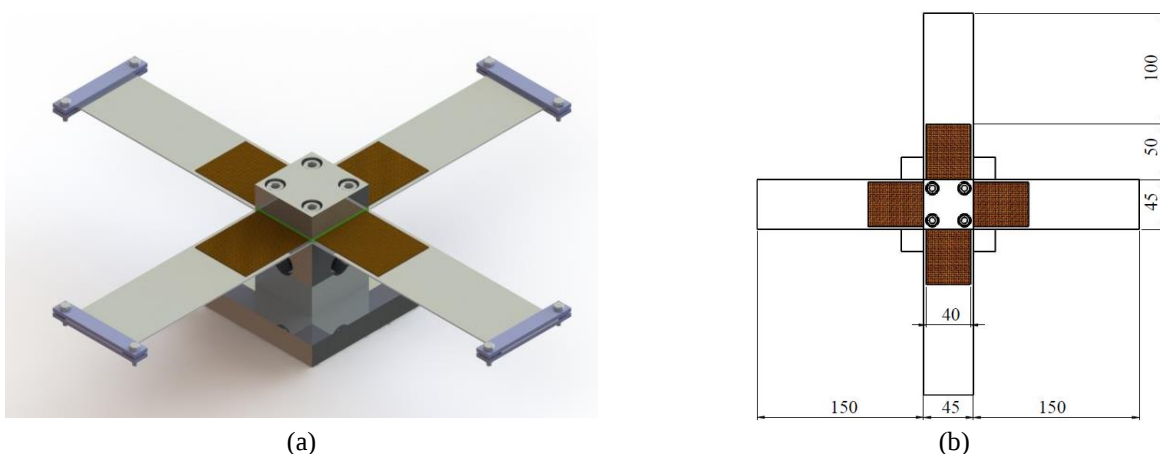


Figura 3. (a) Protótipo do Absorvedor Dinâmico de Vibrador - Gerador de Energia; (b) Dimensões das vigas de alumínio do ADV – GE.

Como mostrado na Fig. 4(a), serão colados quatro transdutores piezelétricos do tipo ACX – QP20W, conforme a Fig. 3(b). E na Fig. 4(b) são apresentadas as propriedades e dimensões do ACX.

Implementou-se um modelo de elementos finitos no *software Ansys* do ADV sem os transdutores piezelétricos. O ADV foi anexado na extremidade livre de uma viga do tipo engastada- livre constituída de aço (comprimento: 1 m, largura: 0,051 m e espessura de 0.025 m), conforme a Fig.5(a). Na Fig. 5(b) é mostrado o detalhe da conexão da viga com o ADV. Foi implementado um modelo simplificado de vigas tridimensionais e massa concentrada, utilizando os elementos de viga Beam4 e massa concentrada Mass21, respectivamente.

Foi feito uma análise harmônica no nó de conexão entre a viga e o ADV, aplicando-se uma força unitária neste nó. O amortecimento da estrutura foi assumido proporcional, de modo que a matriz de amortecimento é assumida conforme a Eq.1.

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K},$$

Eq.1

sendo,

C: Matriz de Amortecimento; **M:** Matriz de Massa; **K:** Matriz de Rigidez,

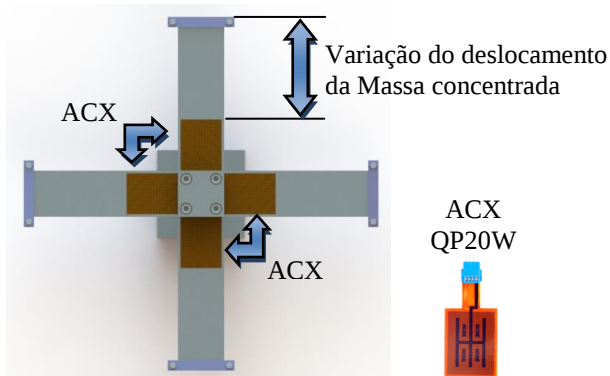
$\alpha [rad / s]$: Coeficiente de proporcionalidade ($\alpha = 4,886$)

$\beta [rad / s]$: Coeficiente de proporcionalidade ($\beta = 1,2433 \cdot 10^{-5}$).

Na Tab.1 são apresentadas as propriedades dos materiais que constituem a viga e o ADV, o aço e o alumínio, respectivamente.

Tabela 1. Propriedades do Aço e Alumínio utilizados no Ansys.

Propriedade	Aço	Alumínio
Módulo de Elasticidade [N/m ²]	2,1.10 ¹¹	0,7.10 ¹¹
Coeficiente de Poisson	0,3	0,33
Densidade [kg/m ³]	7800	2700

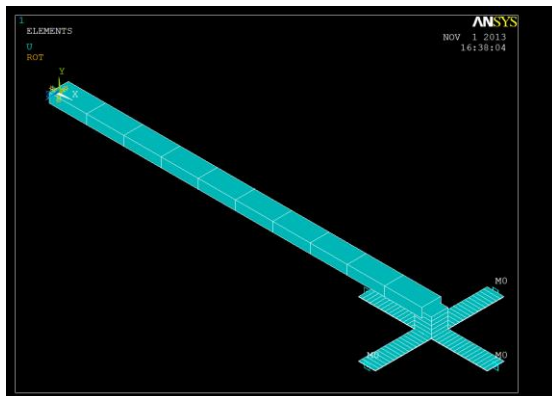


Tipo de aplicação	Atuador por deformação ou atuador bimórfico
Dimensão do Dispositivo (pol)	2.00 x 1.50 x 0.03
Massa do dispositivo (oz -onça)	0.28
Elementos Ativos	Dois transdutores empilhados
Dimensão da pastilha (pol)	1.81 x 1.31 x 0.01
Capacitância do dispositivo (μF)	0.20
Faixa de fundo de escala de tensão elétrica	±200

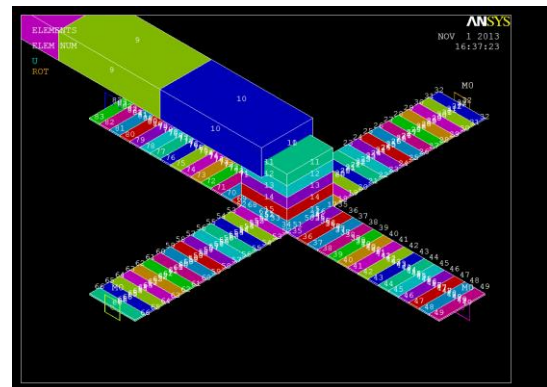
(a)

(b)

Figura. 4. (a) Variação do deslocamento da massa concentrada e Transdutor piezoeletrico do tipo ACX (Midé); (b) Propriedades do transdutor piezoeletrico QP20W



(a)



(b)

Figura. 5. Modelo em elementos finitos no software Ansys: (a) Viga + ADV; (b) Absorvedor dinâmico de vibração.

O resultado obtido é demonstrado na Fig. 6, onde têm-se os gráficos da função resposta em frequência da viga, da viga com o ADV sem amortecimento e da viga com ADV com amortecimento proporcional. Verificou-se com a adição do ADV sem amortecimento na estrutura primária, houve o aparecimento de uma antirressonância próximo à frequência natural de 133 Hz da viga. E os outros picos das frequências naturais foram deslocados e houve uma pequena diminuição da amplitude. E ao se adicionar o amortecimento proporcional, houve uma maior redução das amplitudes de vibração.

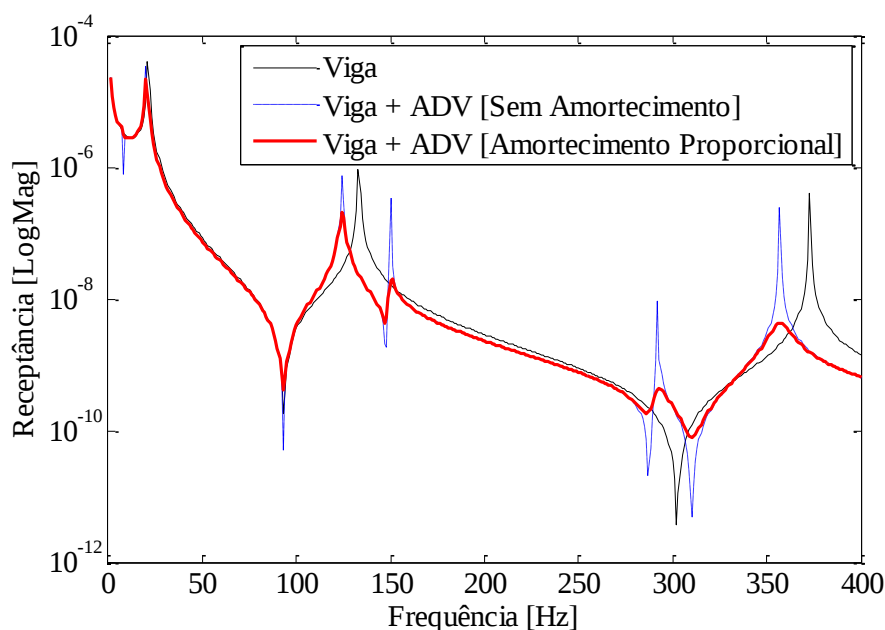


Figura. 6. FRF da Viga e do conjunto Viga + ADV com e sem amortecimento.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados numéricos apresentados, o ADV se mostrou eficiente para atenuação de vibração. E com o intuito de aumentar a eficiência deste dispositivo, serão acoplados transdutores piezelétricos no ADV. Além disso, o ADV será testado para estruturas robustas, e os resultados numéricos serão confrontados com valores experimentais.

5. REFERÊNCIAS

- Adhikari, S., Friswell, M., I., Inman, D., J., “ Piezoelectric energy harvesting from broadband random vibrations.”, Smart Materials and Structures, Vol. 18, pp. R1- R7, 2009.
- Ali, S. F., Adhikari, S., 2012, "Energy harvesting dynamic vibration absorbers", Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 80, pp. 041004-1- 041004-9.
- Cunha Jr, S. S., 2004, “Avaliação numérica e experimental de absorvedores dinâmicos de vibrações ativos e adaptativos”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil.
- De Marqui Jr., C. M., Erturk, A., Inman. D. J., 2009, “ Piezo-aero-elastic modeling and Analysis of a Generator Wing”, Submetido no Journal of Sound and Vibration, pp.1-36.
- Godoy, T. C., 2012, “Projeto, otimização e análise de incertezas de um dispositivo coletor de energia proveniente de vibrações mecânicas utilizando transdutores piezelétricos e circuito ressonante”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- Leo, D. J., “Engineering Analysis of Smart Material Systems”, John Wiley and Sons, Inc., ISBN 978-0-471-68477-0.

- Liang, J. R., Liao, W. H., 2009, “Piezoelectric Energy Harvesting and Dissipation on Structural Damping”, Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 20, pp. 515-527.
- Wang, Y., and Inman, D. J., 2012, A Survey of Control Strategies for Simultaneous Vibration Suppression and Energy Harvesting, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.23, No.18, pp. 2021 - 2037.
- Rade, D. A., Steffen Jr., V., 2000, “ Optimization of Dynamic Vibration Absorbers over a Frequency Band”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.14, nº5, pp. 679-690.
- Korennev, B. G., Reznikov, L. M., 1993, “ Dynamic Vibration Absorbers. Theory and Technical Applications”, John Wiley and Sons, Ltd.
- RAO, S.S. Vibrações Mecânicas, 4 ed., São Paulo: Prentice Hall, 2008.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.