

Análise dinâmica aplicada ao controle de vibrações em protótipo de edifício incorporando molas LMF superelásticas

Yuri José Oliveira Moraes ^[1], Antonio Almeida Silva ^[2], Marcelo Cavalcanti Rodrigues ^[3], Rômulo Pierre dos Reis ^[4], Pedro Igor Moreira ^[5]

[1] yurijmoraes@gmail.com. UFPB. [2] antonio.almeida@ufcg.edu.br. UFCG. [3] marcelo.labii@gmail.com. UFPB. [4] soromulo@gmail.com. UFERSA. [5] pedro_igor_moreira@hotmail.com. UFCG.

RESUMO

O aumento da esbelteza e flexibilidade de estruturas de construção civil levou, nos últimos anos, a avanços tecnológicos em estudos de sistemas submetidos à ação de cargas dinâmicas de diversas naturezas. Essas estruturas, quando excitadas, podem causar desconforto aos usuários e até o próprio colapso. Nesse contexto, o controle dessas vibrações é necessário para se evitar danos e futuras falhas estruturais. No presente trabalho aplica-se um dispositivo de controle passivo de vibrações através da incorporação de molas de uma Liga com Memória de Forma (LMF) em seu estado de superelasticidade. Em uma primeira fase, foram realizados estudos prévios de modelagem analítica e numérica do sistema sem os elementos passivos e, posteriormente, testes dinâmicos experimentais, para fins de validação do mecanismo de controle, num pórtico de edifício de dois graus de liberdade (2GDL). Na montagem foram incorporados fios de aço acoplados aos elementos amortecedores, visando aumentar o amortecimento estrutural e reduzir a transmissibilidade de deslocamento. Os resultados apontam que a aplicação desse dispositivo de controle passivo diminui o tempo de atenuação do sinal de aceleração em 14 segundos, acresce em até 192% o amortecimento estrutural e reduz a transmissibilidade de deslocamento em até 56,6%, o que valida a técnica de controle empregada.

Palavras-chave: Pórtico de edifício. Análise modal. Controle passivo de vibrações. Ligas com Memória de Forma (LMF). Amortecimento estrutural.

ABSTRACT

In the last years, the increase of the slenderness and flexibility of civil construction structures has resulted in technological advances in studies of systems submitted to the action of dynamic loads of diverse natures. These structures, when excited, can cause discomfort to users and even result in their collapse. In this context, it is necessary to the control these vibrations in order to avoid damages and future structural failures. In the present work, a passive vibration control device is applied through the incorporation of coil springs of a Shape Memory Alloy (SMA) in its superelastic state. In a first phase, we will carry out studies of analytical and numerical modeling of the system without the passive elements and then we will execute experimental dynamic tests for the purpose of validation of the control mechanism in a building of two degrees of freedom (2DOF). In the assembly, wires of steel coupled with the damping elements were incorporated to the dampers aiming to increase the structural damping and reduce the transmissibility of displacement. The results indicate that the application of this passive control device decreases the acceleration signal attenuation time in 14 seconds, adds up to 192% structural damping and reduces the displacement transmissibility by up to 56.6%, which validates the control technique employed.

Keywords: Building device. Modal analysis. Passive vibration control. Shape Memory Alloys (SMA). Structural damping.

1 Introdução

As vibrações ou oscilações de natureza mecânica são fenômenos importantes do mundo físico, e suas manifestações ocorrem com frequência no universo que nos cerca. Podemos verificar esses efeitos também no nosso cotidiano, em utensílios caseiros, como o aparelho elétrico de barbear, cordas de um violão, máquina de lavar etc., nos quais geralmente há geração de vibração com alta frequência, porém com baixa amplitude (FRANÇA; SOTELO JÚNIOR, 2006). Vibrações dessa natureza podem ocasionar frequentemente falhas por fadiga nos elementos de máquinas. Já vibrações provenientes de intempéries naturais, como é o caso de ações de ventos, tremores e sismos e ondas do mar, são geralmente associadas a baixas frequências e altas amplitudes, ocasionando falhas em estruturas devido ao grande deslocamento de massa produzido.

O estudo dessas oscilações e de seus efeitos é de grande importância para a engenharia moderna. A análise de vibrações em máquinas, equipamentos e estruturas permite-nos projetá-los e otimizá-los, para garantir qualidade, conforto e durabilidade. Todo sistema mecânico apresenta um determinado nível de vibração devido a sua própria operação ou causado por agentes externos. Ocorrem de forma corriqueira, entretanto, vibrações excessivas, ocasionadas por defeitos mecânicos ou perturbações secundárias, podem acarretar um aumento de custo e diminuição da qualidade e do desempenho do sistema.

Na construção de um design/projeto estrutural, o engenheiro projetista deve levar em consideração não só o carregamento exercido pelo peso próprio da estrutura e as condições de uso (por exemplo, movimentação de pessoas, automóveis, cargas etc.), mas também as solicitações resultantes de fenômenos naturais como abalos sísmicos, ação de ventos e sobrecargas diversas.

A solicitação sísmica depende diretamente da massa da estrutura, rigidez de seus membros e fator de amortecimento. O isolamento e o controle estrutural, basicamente, promovem uma alteração nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura, seja pela adição de dispositivos externos ou pela ação de forças. Esse tipo de controle é classificado como controle passivo, ativo, híbrido ou semiativo (SPENCER JR.; SOONG, 1999).

No âmbito de técnicas de isolamento e controle passivo de estruturas, atualmente vem sendo bem

explorada a aplicação de novos materiais funcionais ou inteligentes para reforçá-las. Os materiais ditos inteligentes são capazes de sofrer alterações significativas de suas propriedades (ex. viscosidade, rigidez, reologia, amortecimento etc.) quando submetidos a determinados estímulos (ex. variação de temperatura, tensão mecânica e elétrica etc.). Essas alterações podem ser exploradas de forma a permitir o emprego desses dispositivos como atuadores e/ou sensores (OLIVEIRA, B. A., 2008). Exemplos de materiais inteligentes são os com característica piezoelétrica, as ligas com memória de forma, entre outros (OLIVEIRA, M. S., 2008).

O presente estudo tem como objetivo principal analisar um sistema dinâmico do tipo pórtico de edifício com dois graus de liberdade sujeito a forças excitadoras de natureza periódica e harmônica, visando à inclusão de técnicas de controle passivo de vibrações, através da incorporação de molas LMF superelásticas acopladas diagonalmente no sistema. Esses elementos têm a capacidade de introduzir um acréscimo de amortecimento e, conseqüentemente, diminuir as amplitudes de resposta da estrutura, com o mínimo de modificação de suas características modais e estruturais, como frequências naturais, massa e rigidez, mantendo, assim, os requisitos iniciais de projeto.

2 Referencial teórico

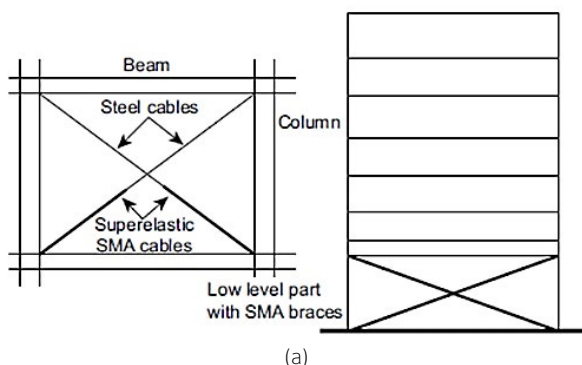
2.1 Controle passivo de vibrações em estruturas

Os sistemas de controle de vibração são aplicados em estruturas com o objetivo de evitar ou diminuir os danos causados por níveis de amplitude críticos. Os métodos de controle passivo de vibração lidam diretamente com as propriedades físicas da estrutura, como a rigidez estrutural, massa e amortecimento. Esse controle deve agir através da adição de um elemento passivo, que é um dispositivo cuja função não depende de uma fonte de energia externa (AQUINO, 2011).

Os dispositivos usados nesse tipo de controle dissipam a energia cinética que é desenvolvida quando há movimento ou excitação da estrutura. Essa técnica tem a vantagem de ser econômica, de baixa manutenção e alto grau de confiabilidade. Pode-se citar como exemplo de método passivo a adição, em estruturas, de cabos de LMF em forma de tendões – como pode ser visto na Figura 1 –, que, quando

tensionados, aumentam a rigidez estrutural dos pavimentos do sistema (JANKE *et al.*, 2005; MENNA; AURICCHIO; ASPRONE, 2014).

Figura 1 – Representação de tendões LMF em estruturas de construção civil. (a) Esquema dos cabos em edifício; (b) Torre da Igreja de San Giorgio acoplada com dispositivo antiterremoto



Fonte: Adaptado de Janke *et al.* (2005) e Menna, Auricchio e Asprone (2014)

2.2 Ligas com Memória de Forma e aplicações

Em termos de microestrutura, as LMFs podem existir em duas fases sólidas distintas, apresentando três tipos de estruturas cristalinas: martensita maclada, martensita não maclada ou orientada e austenita (SUN; HUANG, 2009; MIHÁLCZ, 2001). A estrutura austenítica é estável a altas temperaturas, enquanto a martensítica é estável a temperaturas mais baixas. Quando uma LMF é aquecida, ela passa da fase martensita para a fase austenita.

A temperatura de início da austenita (A_s) é a temperatura na qual essa transformação começa, e a temperatura (A_f) é aquela na qual essa transformação está completa. Uma vez que uma liga dessa natureza é

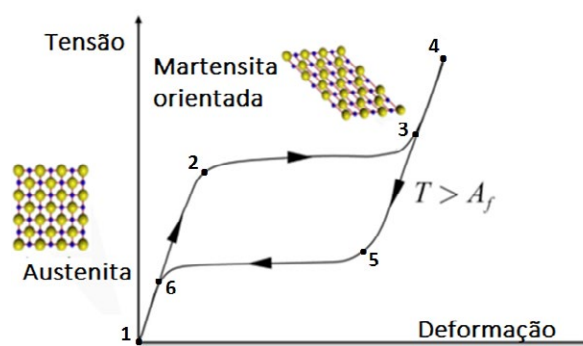
aquecida além de (A_s), ela começa a se contrair e a se transformar na estrutura austenita, para recuperar sua forma original. Essa transformação é possível mesmo estando em alto carregamento, resultando, assim, em altas densidades de energia de atuação (LAGOUDAS, 2010).

Durante o processo inverso, de resfriamento, a transformação começa a reverter para a martensita em estágio de (M_s) e está completa quando atinge a temperatura de martensita final (M_f) (BUEHLER; GILFRICH; WILEY, 1963). O mais alto grau de temperatura a partir do qual a martensita já não pode ser induzida por tensão é chamado (M_d), e acima dessa temperatura a LMF é permanentemente deformada, assim como qualquer material metálico (DUERIG; PELTON, 1994).

Podem-se observar dois aspectos importantes nas LMFs: o primeiro deles, e aplicação do presente estudo é o efeito da superelasticidade, no qual, a temperaturas acima de (A_f), o material é capaz de suportar grandes deformações com baixa distorção residual em processo de histerese (LAGOUDAS, 2008). Outro fenômeno é o efeito de memória de forma, no qual o material, ao final de um processo de aplicação de deformações, feito a temperatura constante e mais baixa, apresenta uma elongação residual que pode ser recuperada através de um ciclo térmico.

A superelasticidade apresenta uma histerese no gráfico “tensão/deformação” na qual a transformação de fases irá depender da velocidade com que a tensão mecânica é induzida no material, tornando a resposta dinâmica muito mais rápida; quanto maior for esse laço da histerese, maior será a absorção de energia pelo material em um sistema vibratório (LECCE; CONCILIO, 2014). Na Figura 2 é mostrado esse fenômeno.

Figura 2 – Gráfico “Tensão/Deformação” típico de uma LMF com propriedade superelástica

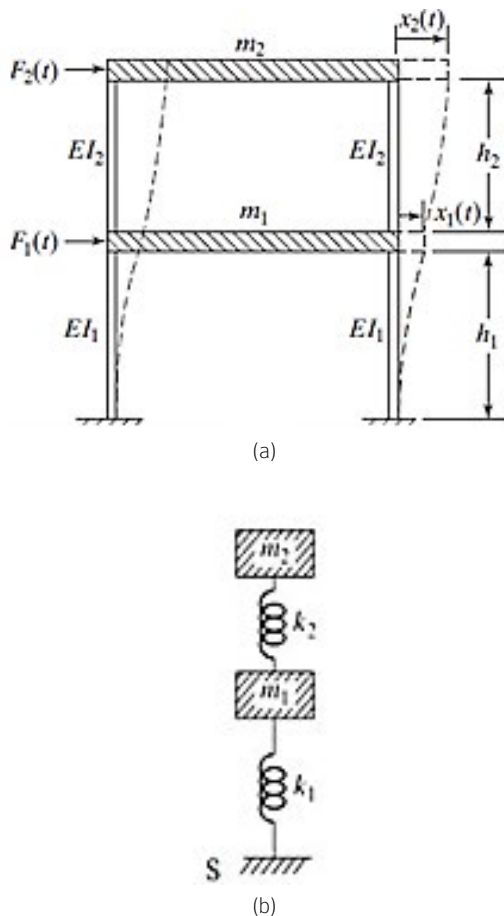


Fonte: Adaptado de Lecce e Concilio (2014)

2.3 Modelo dinâmico do sistema estrutural

Todo sistema que requer na sua solução duas coordenadas independentes para descrever seu movimento é denominado sistema com dois graus de liberdade (2GDL) (RAO, 2008). A Figura 3a ilustra um modelo típico de edifício sob o efeito de cargas laterais, no qual se supõe que as massas estejam ligadas por elementos elásticos (colunas), como é possível ver na representação de um sistema massa-mola da Figura 3b. As massas m_1 e m_2 representam os pisos, e k_1 e k_2 , as rigidezes das colunas.

Figura 3 – Representação de modelo com 2GDL. (a) Edifício de dois andares; (b) Massas concentradas



Fonte: Rao (2008)

A Equação 1 representa o sistema massa-mola sem amortecimento para uma dada excitação $F(t)$, conforme evidenciado na Figura 3a. Pela equação de movimento de Newton, tem-se que:

$$[m]\ddot{\vec{x}}(t) + [k]\dot{\vec{x}}(t) = \vec{F}(t) \tag{1}$$

As matrizes resultantes da Equação 1 são dadas de acordo com a representação a seguir:

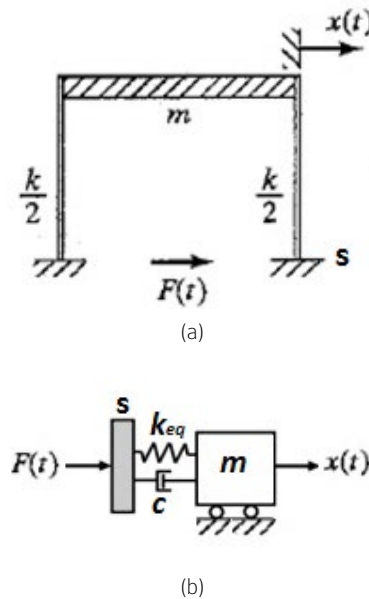
$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}; [k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

A resposta desse sistema no tempo pode ser obtida através de métodos analíticos ou numéricos, observando-se as frequências naturais e os modos de vibração (INMAN, 2001).

2.4 Transmissibilidade de deslocamento

Na Figura 4a, é ilustrado um sistema de um grau de liberdade (1GDL) excitado por uma força harmônica e periódica pela base. Na Figura 4b, tem-se a sua representação a partir de um sistema massa-mola-amortecedor.

Figura 4 – Modelo com 1GDL e base móvel. (a) Pórtico de edifício; (b) Modelo de massa concentrada



Fonte: Rao (2008)

A transmissibilidade de deslocamento é definida como sendo a divisão entre a amplitude da resposta referente ao deslocamento da massa m e a amplitude da entrada relativa ao deslocamento da base. A equação da transmissibilidade é dada por:

$$T = \frac{\sqrt{1+(2\zeta r)^2}}{\sqrt{(1-r^2)+(2\zeta r)^2}} \tag{3}$$

Em que a razão $r = \omega / \omega_n$ determina o fator da frequência de excitação e da frequência natural do sistema. A Equação 4 evidencia o amortecimento viscoso, obtido a partir do método analítico de largura de banda. Esse método deve ser aplicado a partir da obtenção das curvas função resposta em frequência (FRF) do sistema (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

$$\zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega^2 - \omega_1}{\omega_n} \right) \tag{4}$$

3 Método da pesquisa

O desenvolvimento deste estudo ocorreu a partir das seguintes etapas de metodologia:

- 1) Projeto e desenvolvimento do modelo estrutural do pórtico de edifício;
- 2) Modelagem numérica através do software comercial *SolidWorks*®;
- 3) Modelagem analítica a partir de solução em ambiente *MatLab*®;
- 4) Análise experimental da estrutura em vibração livre sem/com as molas LMF superelásticas;
- 5) Testes dinâmicos da estrutura em vibração forçada sem/com as molas LMF superelásticas.

3.1 Concepção do modelo e elementos LMF

A estrutura utilizada nos ensaios experimentais é do tipo pórtico e representa um edifício de dois pavimentos, como mostrada na Figura 5. Seus pisos e colunas são constituídos de aço comum SAE 1020, com cantoneiras e parafusos também de aço, como elementos de ligação viga-pilar.

As molas LMF superelásticas usadas neste estudo são mostradas na Figura 6a. São utilizadas originalmente na área de ortodontia corretiva e cirúrgica e são fabricadas em uma liga de nitinol, largamente empregada na fabricação de materiais com memória e propriedade superelástica.

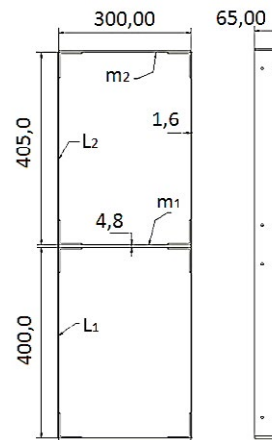
O comprimento útil das molas LMF foi de aproximadamente 10,0 mm. Foi utilizado um pré-tensionamento inicial de 100% do seu comprimento útil. A fixação dos elementos na estrutura foi feita através de tirantes de aço comum amarrados aos olhais das molas e fixados à estrutura. Para o tensionamento

dos fios e das molas LMF, foi utilizado um sistema de catraca com trava, como pode ser visto na Figura 6b.

Figura 5 – Modelo estrutural. (a) Pórtico com dois pisos; (b) Dimensões principais (mm)



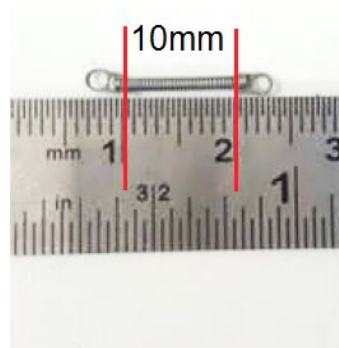
(a)



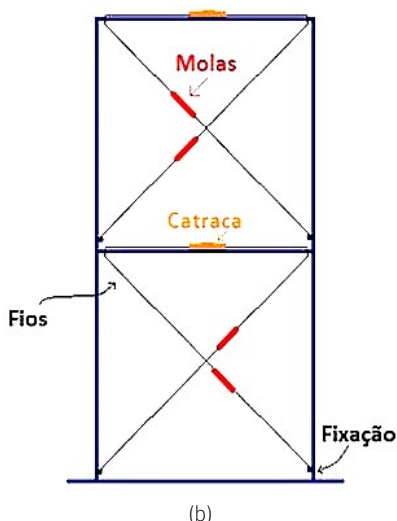
(b)

Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 6 – Elementos utilizados no ensaio experimental. (a) Amostra de minimola superelástica de liga nitinol; (b) Esquema de montagem das molas na estrutura



(a)



Fonte: Elaborada pelos autores

3.2 Teste experimental em vibração livre

Os testes em vibração livre foram realizados com a finalidade de se obter as frequências naturais do sistema, através do espectro de frequências, como também uma resposta da estrutura à ação de uma força transiente do tipo impacto e, assim, gerar um gráfico de resposta da amplitude de deslocamento *versus* tempo.

O experimento foi dividido em duas etapas. Foi utilizado um acelerômetro acoplado no segundo piso da estrutura, bem como um excitador do tipo martelo de impacto, seguindo a sequência do ensaio exibida na Figura 7.

Figura 7 – Esquema de instrumentação e captação dos sinais gerados em vibração livre



Fonte: Elaborada pelos autores

3.3 Teste experimental em vibração forçada

Os testes experimentais da estrutura em vibração forçada a partir da base foram realizados para analisar o comportamento do sistema quando submetido a forças de natureza harmônica. A excitação foi realizada a partir da base com o uso de uma mesa vibratória, numa dada faixa de frequências. Por meio

da medição dos deslocamentos nos respectivos pisos, foi possível obter a Função Resposta em Frequência (FRF) em termos de amplitudes de resposta e, com isso, extrair parâmetros, tais como suas frequências naturais, transmissibilidades de deslocamento e fatores de amortecimento.

O equipamento usado nessa etapa foi o excitador eletromecânico modelo *Quanser® Shake Table II*, com 1GD. Ele opera em uma faixa de até 15 Hz, com aceleração e deslocamentos máximos de 24,5 m/s² e ± 7,6 cm respectivamente. A carga de ensaio é de até 7,5 kg.

A mesa é gerenciada por um computador e seu software de comando, o *QUARC®*, através da plataforma *Shake Table II Control®* ou da interface do *Matlab®* a partir do *Simulink®*. Os sinais de entrada e de saída da estrutura foram capturados por meio de sensores do tipo LVDT, modelos *WI/10 mm-T* e *WA/20 mm-L*, ambos da fabricante *HBM®*, e registrados pelo sistema de aquisição de dados *QuantumX®*, do mesmo fabricante, juntamente com o software de análise de sinais *CatmanEasy®*. O tratamento de dados foi realizado no *Matlab®*.

O procedimento foi dividido em duas etapas principais, sendo a primeira para a estrutura sem a incorporação das molas LMF e a segunda para o pórtico com a incorporação do sistema de controle passivo adotado, ou seja, a incorporação de quatro molas superelásticas acopladas diagonalmente nos pavimentos da estrutura; cada uma dessas etapas foi subdividida em duas medições, uma para cada piso. Os testes seguiram a sequência de ensaio mostrada na Figura 8:

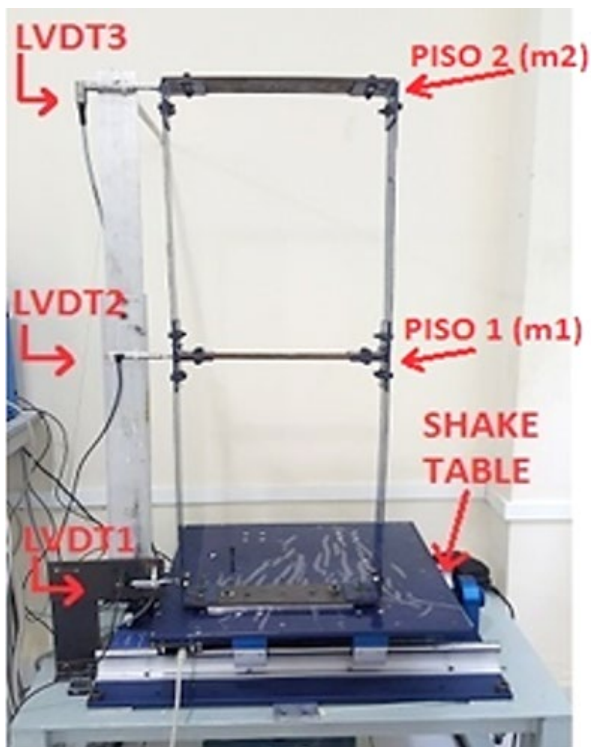
Figura 8 – Esquema de instrumentação e captação dos sinais gerados em vibração forçada a partir da base



Fonte: Elaborada pelos autores

O sistema montado com toda a instrumentação utilizada nos ensaios experimentais é mostrado na Figura 9, na página seguinte.

Figura 9 – Mesa vibratória (Shake Table) com os sensores de deslocamento instalados



Fonte: Elaborada pelos autores

4 Resultados da pesquisa

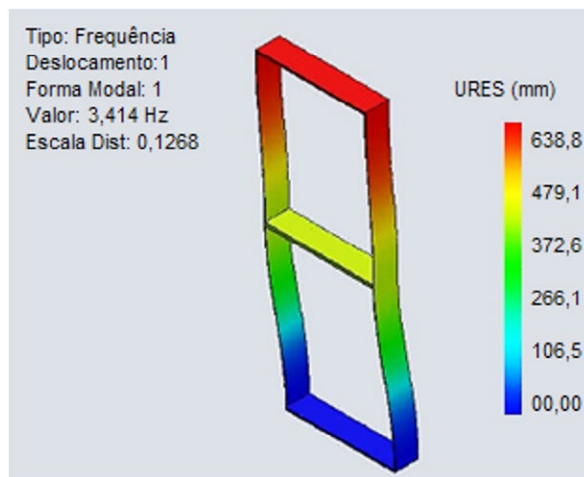
4.1 Resultados numéricos

Os resultados da análise numérica para as duas primeiras frequências naturais e respectivos modos de vibrar do pórtico são apresentados na Figura 10.

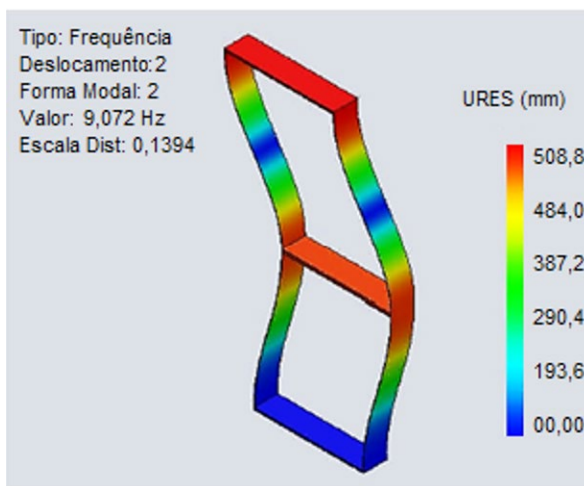
Nas Figuras 10a e 10b, têm-se os modos de vibrar referentes às duas primeiras frequências naturais da estrutura em vista lateral e suas respectivas amplitudes de deslocamento mínimo e máximo em milímetros, amplitudes denotadas na barra de cores.

É possível notar o deslocamento imposto ao sistema observando as variações de posição da estrutura deformada em suas formas modais de vibração. No primeiro modo de vibrar, percebe-se que as maiores amplitudes de deslocamento se encontram no segundo piso do sistema, enquanto, no segundo modo de vibração, o primeiro piso se desloca em sentido oposto ao do segundo pavimento e também apresenta, nesse caso, amplitudes mais altas de deformação.

Figura 10 – Análise numérica. (a) 1º Modo de Vibração ($f_1 = 3,41$ Hz); (b) 2º Modo de Vibração ($f_2 = 9,07$ Hz)



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelos autores

4.2 Resultados analíticos

Para esta análise foram considerados tanto os parâmetros adotados na modelagem numérica como os dados geométricos e de massa do modelo físico da Figura 5b. Na modelagem analítica, os parâmetros de amortecimento viscoso foram desprezados. O Quadro 1 apresenta os valores geométricos e materiais da estrutura adotados nas simulações e análises.

Quadro 1 – Parâmetros geométricos e materiais adotados

Módulo de elasticidade das colunas E	193 GPa
Comprimento da coluna L ₁	400 mm
Comprimento da coluna L ₂	405 mm
Massa do 1º piso m ₁	1,35 kg
Massa do 2º piso m ₂	1,04 kg
Rigidez equivalente da coluna k ₁	1.606 N/m
Rigidez equivalente da coluna k ₂	1.547 N/m

Fonte: Elaborada pelos autores

Um comparativo dos resultados obtidos nas simulações numérica e analítica do sistema sem a incorporação das molas LMF é evidenciado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo dos resultados obtidos

Frequências Naturais	SolidWorks® (Hz)	Matlab® (Hz)	Erro (%)
f ₁	3,41	3,53	3,5
f ₂	9,07	9,19	1,3

Fonte: Elaborada pelos autores

Deve-se observar que os erros relativos estão dentro do esperado – menos que 5% –, significando coerência dos modelos adotados em cada análise. O *MatLab*® calcula as frequências naturais com base na rigidez experimental, enquanto o software *SolidWorks*® usa um modelo simplificado da estrutura, no qual não há ligações com cantoneiras nem junções por parafusos, o que explica a pequena variação nos modos de vibração.

4.3 Resultados experimentais

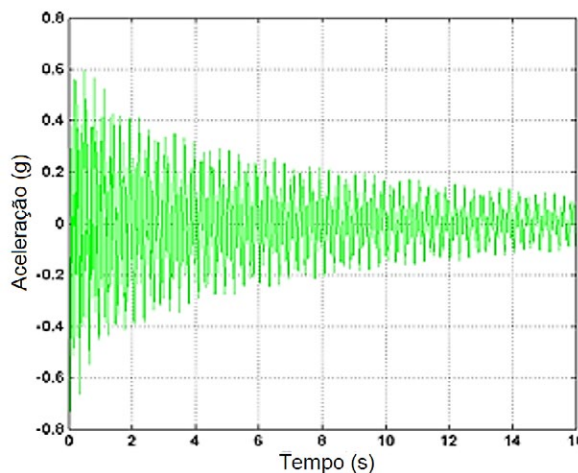
4.3.1 Vibração livre

Os testes em vibração livre forneceram resultados das respostas do deslocamento em função do tempo, obtidos pelo analisador de sinais, além do espectro de frequências FFT (*Fast Fourier Transform*), para uma faixa de frequência de 0 a 15 Hz. As Figuras 11 e 12 evidenciam as amplitudes de aceleração no tempo e na frequência referentes ao pórtico sem e com a incorporação dos absorvedores, respectivamente.

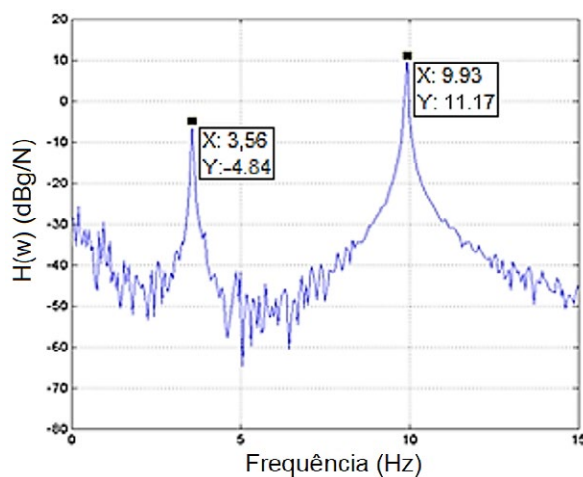
A partir da Figura 11a, percebe-se que, depois de cessado o impacto inicial aplicado, a resposta tende a se estabilizar em equilíbrio estático a partir de 16

segundos. Através do espectro FFT da Figura 11b, foi possível extrair a primeira e a segunda frequência natural da estrutura como sendo 3,56 Hz e 9,93 Hz, respectivamente.

Figura 11 – Testes em vibração livre sem as molas LMF. (a) Resposta no tempo; (b) Espectro de frequências



(a)

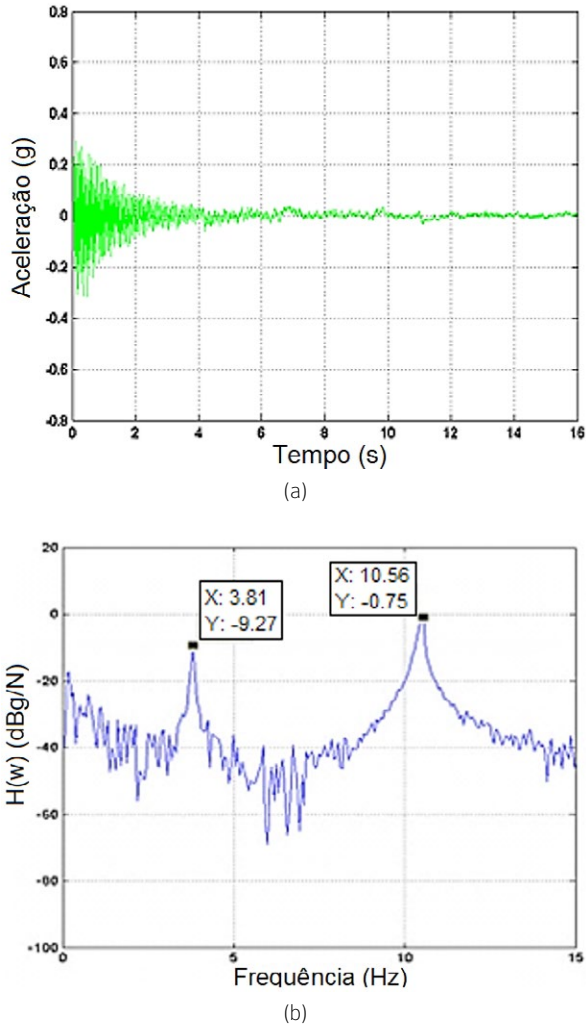


(b)

Fonte: Elaborada pelos autores

Com a incorporação das molas superelásticas no pórtico, percebe-se que, depois de cessado o impacto inicial, a estrutura já se estabiliza a partir dos 3 segundos, conforme ilustrado na Figura 12a. Através do espectro FFT da Figura 12b, foi possível extrair, analogamente ao caso anterior, a primeira e a segunda frequência natural do sistema como sendo 3,81 Hz e 10,56 Hz, respectivamente.

Figura 12 – Testes em vibração livre com as molas LMF. (a) Resposta no tempo; (b) Espectro de frequências



Fonte: Elaborada pelos autores

Comparando os gráficos das Figuras 11 e 12, já fica evidente a atuação das molas como elementos de absorção de energia no sistema, pois nota-se que, no sistema com absorvedor, o tempo necessário para o pórtico se estabilizar é bem menor do que para o caso sem absorvedor.

Na Tabela 2 é apresentado um comparativo dos valores das frequências naturais para os dois casos, mostrando a variação percentual.

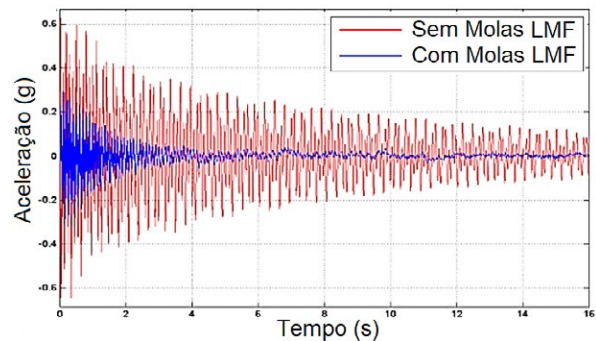
Tabela 2 – Comparativos dos valores de frequência natural do sistema em vibração livre

Frequências Naturais	Sem molas LMF (Hz)	Com molas LMF (Hz)	Erro (%)
f_1	3,56	3,81	7,0
f_2	9,93	10,56	6,3

Fonte: Elaborada pelos autores

Observa-se um pequeno aumento das frequências naturais do sistema devido à introdução dos tirantes de aço acoplados com as molas LMF ao pórtico, tirantes que tendem a elevar o valor da rigidez estrutural e, conseqüentemente, elevar os valores das frequências naturais. A Figura 13 evidencia um comparativo das respostas da estrutura no tempo para essas duas configurações superpostas.

Figura 13 – Comparação das respostas de aceleração no tempo para o pórtico sem e com as molas LMF



Fonte: Elaborada pelos autores

4.3.2 Vibração Forçada

4.3.2.1 Testes do pórtico sem molas LMF

A partir dos testes de vibração forçada, puderam ser obtidas as FRFs (funções resposta em frequência) do sistema. A partir das FRFs, foi possível estimar os fatores de amortecimento (ξ) para cada uma das situações em estudo, através do método de largura de banda. Nesse método, a medida do fator de amortecimento é baseada na resposta em frequência. Este gráfico representa a resposta da saída para uma entrada senoidal, tomando um certo valor de frequência. A largura da banda (a meia potência) é definida como a largura da curva da FRF quando a magnitude "Q" é $1/\sqrt{2}$ vezes o valor do pico.

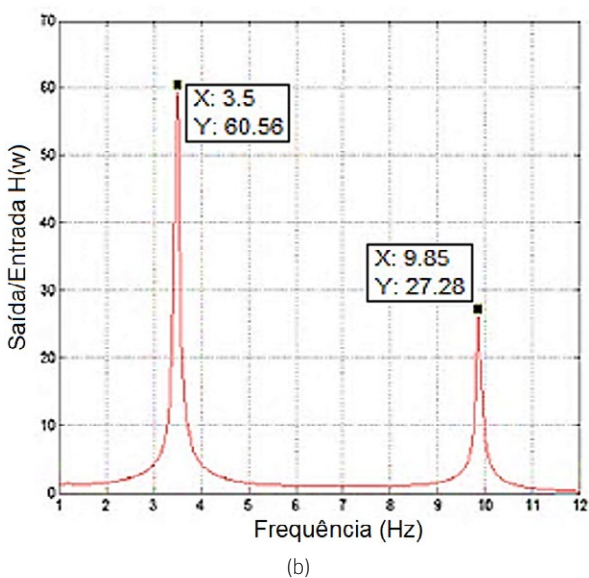
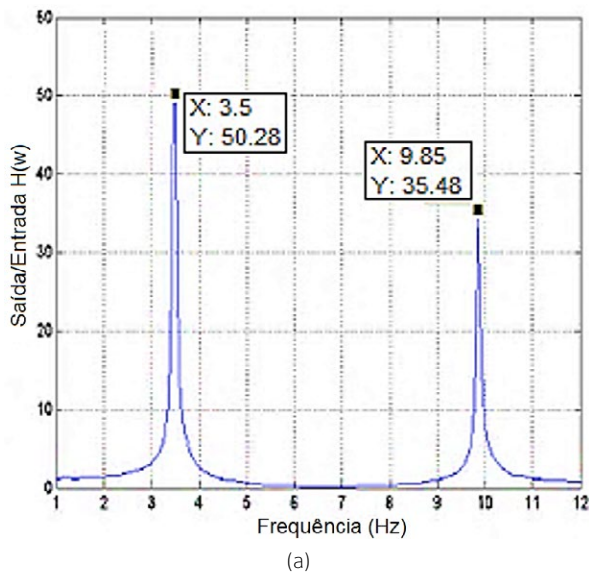
Este valor é denotado por " $\omega = (\omega_2 - \omega_1)$ ", e pode ser relacionado com o amortecimento viscoso da seguinte forma: $\omega = 2\xi\omega_n$. Os valores são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Fatores de amortecimento sem molas LMF

Frequências Naturais	ξ 1º Piso	ξ 2º Piso
f_1	0,0143	0,0143
f_2	0,0025	0,0051

Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 14 – FRF em escala linear da estrutura sem molas LMF. (a) FRF do 1º Piso; (b) FRF do 2º Piso



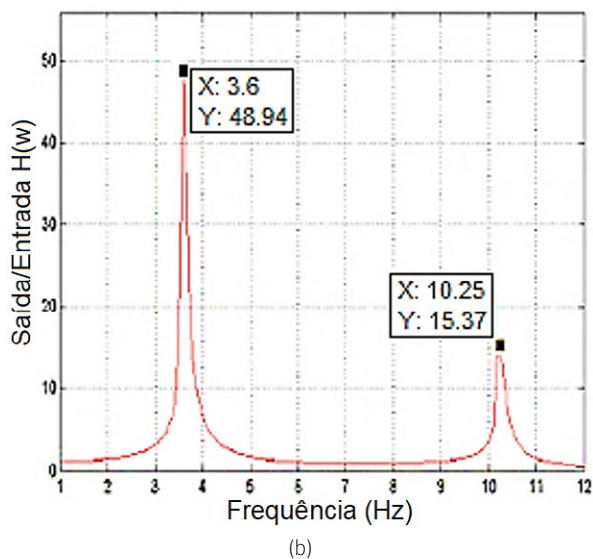
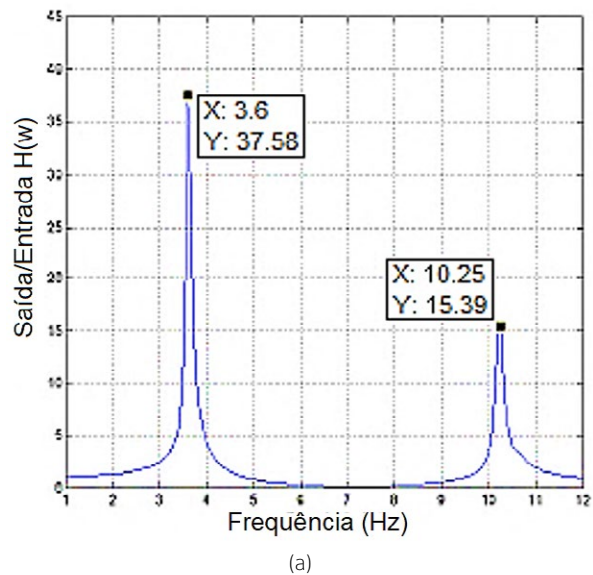
Fonte: Elaborada pelos autores

Na Figura 14 são mostradas as FRF do sistema obtidas para o primeiro e segundo pavimentos sem as molas. Por esses gráficos é possível determinar as frequências naturais do sistema, que coincidem com os resultados anteriores de vibração livre.

4.3.2.2 Testes do pórtico com molas LMF

Os gráficos mostrados na Figura 15 representam as FRF obtidas para o primeiro e segundo pisos com a incorporação das molas LMF. Os valores obtidos para os fatores de amortecimento estão evidenciados na Tabela 4.

Figura 15 – FRF em escala linear da estrutura com molas LMF. (a) FRF do 1º Piso; (b) FRF do 2º Piso



Fonte: Elaborada pelos autores

Tabela 4 – Fatores de amortecimento com molas LMF

Frequências Naturais	ξ 1º Piso	ξ 2º Piso
f_1	0,0139	0,0139
f_2	0,0073	0,0098

Fonte: Elaborada pelos autores

De acordo com os gráficos obtidos, houve um ligeiro aumento nas frequências naturais do pórtico devido ao incremento de rigidez na estrutura. As frequências naturais apresentaram valores de 3,60 Hz e 10,25 Hz, respectivamente. Na Tabela 5 é apresentado um comparativo entre os valores das frequências naturais para o pórtico sem e com as molas LMF.

Tabela 5 – Comparativos dos valores de frequência natural em vibração forçada

Frequências Naturais	Sem molas LMF (Hz)	Com molas LMF (Hz)	Erro (%)
f_1	3,50	3,60	2,8
f_2	9,85	10,25	4,0

Fonte: Elaborada pelos autores

As transmissibilidades de deslocamento também foram quantificadas para as duas configurações adotadas e as transmissibilidades são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 – Comparativos dos valores de transmissibilidade de deslocamento da estrutura

Freq. Naturais	Sem molas LMF 1º Piso	Com molas LMF 1º Piso	Redução (%)
f_1	50,28	37,58	25,3
f_2	35,48	15,39	56,6
Freq. Naturais	Sem molas LMF 2º Piso	Com molas LMF 2º Piso	Redução (%)
f_1	60,56	48,94	19,2
f_2	27,28	15,37	43,6

Fonte: Elaborada pelos autores

Como era esperado, houve uma significativa redução das transmissibilidades de deslocamento para os dois pisos nos dois modos de vibrar ao se introduzir no pórtico os elementos de molas superelásticas, o que valida o presente estudo.

Essa redução da transmissibilidade é resultado da dissipação de energia mecânica no sistema, gerada pelos elementos absorvedores LMF ao sofrerem deformação dentro do seu laço de histerese. Com isso, há um aumento de amortecimento estrutural e, conseqüentemente, um melhor controle de vibrações em determinadas frequências críticas, ou seja, nas frequências de ressonância da estrutura.

5 Conclusão/Considerações

Neste estudo, foram analisados dois modelos, analítico e numérico, representados em ambientes MatLab® e SolidWorks®, sendo observado que eles podem bem representar o comportamento de modelos reais de edifício, com erros da ordem de até 3,5%. Estes valores mostraram uma coerência com resultados da literatura (OLIVEIRA, B. A., 2008; SILVA, 2016).

Os testes de vibração livre evidenciaram que os valores de frequências naturais sofrem um pequeno acréscimo quando são incorporadas as molas LMF superelásticas, acréscimo resultante de uma rigidez adicional que essa nova configuração impõe.

Todavia, nesses testes é possível perceber, através da resposta de aceleração no tempo, a diminuição dos valores de amplitude e aumento da atenuação da resposta quando a estrutura é submetida a um impacto lateral: o tempo de atenuação do sinal foi reduzido em até 14 segundos e a dissipação de energia no sistema foi, dessa forma, demonstrada.

Os ensaios experimentais em vibração forçada a partir da base revelaram uma boa eficiência da incorporação das molas LMF, apresentando reduções dos valores de transmissibilidade de até 56,6% no primeiro pavimento e até 43,6% no segundo pavimento da estrutura.

Finalmente, conclui-se que a aplicação desses elementos pode aumentar a integridade estrutural do sistema, amplificando o amortecimento em cerca de 192%; esses resultados são coerentes com a literatura (MORAES *et al.*, 2018). Valida-se, assim, a técnica empregada.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, A. S. **Controle de vibração de um sistema sob desbalanceamento rotativo utilizando atuador de liga com memória de forma**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

- BUEHLER, W. J.; GILFRICH, J. V.; WILEY, R. C. Effect of Low-Temperature Phase Changes on The Mechanical Properties of Alloys Near Composition TiNi. **Journal of Applied Physics**, v. 34, n. 5, p. 1475-1477, 1963.
- COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. **Amortecimento**: classificação e métodos de determinação. Informativo Técnico-Científico ITC04-Amortecimento/ATCP. São Carlos: ATCP Engenharia Física, 2010. Disponível em: <https://sonelastic.com/images/ITC04-ATCP> Acesso em: 17 jun. 2019.
- DUERIG, T. W.; PELTON, A. R. Ti-Ni shape memory alloys. In: BOYER, R.; WELSCH, G.; COLLINGS, E. W. (eds.). **Materials Properties Handbook: Titanium Alloys**. Materials Park, OH: American Society for Metals, 1994. p. 1035-1048.
- FRANÇA, L. N. F.; SOTELO JÚNIOR, J. **Introdução às vibrações mecânicas**. São Paulo: Blucher, 2006. 176 p.
- INMAN, D. J. **Engineering Vibration**. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- JANKE, L.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M.; RUTH, J. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures – Overview, limits and new ideas. **Materials and Structures**, v. 38, n. 5, p. 578-592, 2005.
- LAGOUDAS, D. C. (ed.). **Shape memory alloy: modeling and engineering applications**. New York: Springer Science Business Media, 2008. 435 p.
- LECCE, L.; CONCILIO, A. **Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural and Biomedical Applications**. Italy, Napoli: Elsevier, 2014. ISBN 0080999212.
- MENNA, C.; ASPRONE, D.; AURICCHIO, F. Applications of Shape Memory Alloys in Structural Engineering. In: LECCE, L.; CONCILIO, A. **Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural and Biomedical Applications**. Italy, Napoli: Elsevier, 2014, ISBN 978-0-08-099920-3.
- MIHÁLCZ, I. Fundamental characteristics and design method for nickel titanium shape memory alloy. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, v. 45, n. 1, p. 75-86, 2001.
- MORAES, Y. J. O.; SILVA, A. A.; RODRIGUES, M. C.; LIMA, A. G. B.; REIS, R. P. B.; SILVA, P. C. S. Dynamical Analysis Applied to Passive Control of Vibrations in a Structural Model Incorporating SMA-SE Coil Springs. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, Article ID 2025839, 15 p., 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2025839>.
- OLIVEIRA, B. A. **Desenvolvimento de um isolador de vibração pseudoelástico**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- OLIVEIRA, M. S. **Modelo estrutural qualitativo para pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson-Prentice Hall, 2008.
- SILVA, A. G. P. **Controle ativo de vibrações em uma estrutura com 2GDL utilizando transdutores piezoelétricos associados a circuitos Shunt de capacitância negativa**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- SPENCER JR., B. F.; SOONG, T. T. New applications and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA. In: INTERNATIONAL POST-SMiRT CONFERENCE SEMINAR ON SEISMIC ISOLATION, PASSIVE ENERGY DISSIPATION AND ACTIVE CONTROL OF VIBRATION OF STRUCTURES, 1999, Cheju, Korea. **Proceedings** ResearchGate, 1999.
- SUN, L.; HUANG, W. M. Nature of the multistage transformation in shape memory alloys upon heating. **Metal Science and Heat Treatment**, v. 51, n. 11-12, p. 573-578, 2009.