



PIBITI/CNPq/UFPG-2012

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO ISOLADOR DE VIBRAÇÃO APLICADO A ESTRUTURAS SOB EXCITAÇÃO DE BASE UTILIZANDO ELEMENTOS ATIVOS (LMF)

Vanderson Alves Agra Brandão¹, Antonio Almeida Silva²

RESUMO

Em engenharia, as aplicações envolvendo dispositivos absorvedores de vibrações mecânicas são de grande importância nos tempos atuais. Nos projetos de estruturas como edifícios e pontes, que podem estar sujeitos a forças transientes originadas por fortes ventos e terremotos, deve-se levar em conta os problemas causados por vibrações excessivas que podem afetar a integridade estrutural do sistema. No presente estudo foram concebidos estudos de modelagem teórica e a construção experimental de um dispositivo que simula um modelo de edifício com dois graus de liberdade, excitado por forças de base, utilizando elementos ou tendões de LMF com o objetivo de aumentar a rigidez e o amortecimento estrutural, visando a atenuação de vibração. Os resultados preliminares mostraram uma boa redução nos níveis de amplitudes na resposta do sistema implicando num aumento significativo da rigidez estrutural quando o fio de LMF é incorporado.

Palavras-chave: Estruturas de Engenharia, Dispositivo isolador de vibrações, Ligas com Memória de Forma (LMF).

DEVELOPMENT OF VIBRATION ISOLATION DEVICE APPLIED TO STRUCTURES USING ACTIVE ELEMENTS (SMA)

ABSTRACT

In engineering the design of structures of great interest, such as buildings and bridges, that may be affected by forces originated by winds and earthquakes, one should take into account the problems caused by excessive vibration that can affect the structural integrity of the system. In the present study was developed theoretical studies and a experimental prototype that simulate a model with two degrees of freedom subjected to a base excitation, using SMA tendons elements that increase stiffness and damping caused for a shape memory effect incorporated to vibration control. The preliminary results showed a good reduction in the system response level, causing an increased to structural stiffness and damping when the tendons made of shape memory effect is activated.

Keywords: Engineering structures, Vibration isolation device, Shape Memory Alloys (SMA).

¹Aluno do Curso de Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, e-mail: vanderson_agra@hotmail.com.br

²Engenharia Mecânica, Professor Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, e-mail: almeida@dem.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

Em engenharia, as aplicações das vibrações mecânicas são de grande importância nos tempos atuais. Projetos de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas, sistemas de controle e outros, exigem que questões relacionadas com vibrações sejam levadas em conta. Por exemplo, a falha de estruturas causada pelo fenômeno de ressonância, é bastante comum e resulta em deflexões e vibração excessiva observada ao longo do tempo de operação. Também a solitação sísmica, atuando na base de estruturas geralmente está relacionada diretamente com a massa, rigidez e amortecimento estrutural, constituindo assim os principais parâmetros de projeto a serem levados em consideração. Nesses casos, a utilização de técnicas de isolamento e controle de vibração é de grande importância, pois a vibração excessiva em estruturas pode causar perda de desempenho ou até o seu colapso. Atuadores convencionais tais como motores hidráulicos e pneumáticos promovem grandes perdas de energia, têm um grande volume e pesadas massas para o sistema de atuação. Novas tecnologias e materiais estão atraindo atenção para que se desenvolvam sistemas mais leves e com grande poder de atuação (MAVROIDIS, 2007).

Sendo assim, as ligas com memória de forma (LMF) vêm ganhando espaço no que se diz respeito a sua incorporação em dispositivos de isolamento e controle de vibração devido as características que essas ligas possuem, tais como a capacidade de recuperação de sua forma quando a temperatura é aumentada, mesmo sob cargas elevadas, bem como absorver e dissipar energia mecânica quando das mudanças reversíveis de forma, sendo considerados como bons atuadores quando se trata de absorver impactos.

Diversos estudos para atenuação de amplitudes de vibração e aumento de rigidez estrutural em edifícios vem sendo realizados e novas técnicas de isolamento de vibração vêm ganhando cada vez mais atenção da comunidade científica internacional e nacional.

Dentre os avanços tecnológicos das últimas décadas, surgiram os materiais ativos que apresentam características funcionais importantes, mostrando-se como uma alternativa interessante quando incorporados aos materiais estruturais e sistemas passivos clássicos da engenharia (DA SILVA, 2009).

No contexto destes materiais avançados, as LMF são metais que apresentam transformação de fase no estado sólido resultante da aplicação de um carregamento termomecânico (aplicação de uma variação de temperatura ou carregamento mecânico). Esta transformação influencia as propriedades mecânicas como a rigidez e amortecimento de vibrações em estruturas de engenharia.

No presente trabalho foi desenvolvida uma concepção de dispositivo isolador de vibração que explora o comportamento pseudoelástico de ligas com memória de forma (LMF), incorporada num modelo de edifício de dois pavimentos (2 Graus De Liberdade), excitado por uma força transiente gerada por um martelo de impacto instrumentado, visando a obtenção experimental de parâmetros modais de vibração, tais como a frequências naturais e amortecimento. Com o emprego de elementos de fios LMF na forma de tendões treliçados na estrutura pode-se verificar o seu efeito na redução das amplitudes de resposta de vibração. Resultados preliminares mostraram um aumento significativo da rigidez e amortecimento da estrutura, quando da incorporação desses elementos LMF, o que permite concluir que a utilização dessa estratégia de aplicação de elementos LMF em estruturas civis permite reduzir e controlar os níveis de vibrações.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ligas com memória de forma

As LMF são ligas metálicas que sofrem transformações de fase sólido para sólido induzidas por apropriado ciclo de temperatura e/ou acentuadas mudanças, durante as quais elas podem recuperar tensões aparentemente permanentes. Essas ligas têm a capacidade de recuperar a sua geometria original após deformação “pseudoplástica”, ou desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir a recuperação de sua forma original, após a imposição de um campo de temperatura e/ou de tensões, através de transformações de fase induzidas no material. Basicamente, as LMF apresentam duas fases cristalográficas distintas: austenita e martensita (OTSUKA e WAYMA, 1998). Geralmente estes materiais podem ser facilmente deformados plasticamente a uma temperatura relativamente baixa (fase martensita) e ao serem expostos a uma temperatura mais elevada (fase austenita), retomam a forma inicial (antes da deformação) (FERNANDES, 2006).

As LMF apresentam um comportamento completamente diferente dos materiais clássicos. Esse fenômeno está associado a uma transformação martensítica especial, que tem a característica de ser termoelástica e reversível, diferentemente da transformação martensítica que ocorre nos aços. O comportamento termomecânico associado a essa transformação termoelástica envolve o efeito de memória de forma simples e o efeito superelástico.

Efeito memória de forma simples

Quando uma liga metálica é submetida a uma carga além de seu limite elástico, ela se deforma plasticamente e permanece com uma deformação residual, mesmo após removido a força externa. A alteração é irreversível, a não ser quando deformada plasticamente pela segunda vez, aplicando força em direção oposta (VAN HUMBEECK, 1991).

Em uma liga com memória de forma, quando aplicada uma carga que proporcione uma deformação plástica, esta ficará com uma deformação residual como as outras ligas metálicas. Entretanto, toda a deformação e a forma original da liga podem ser recuperadas sem aplicação de força externa, simplesmente aquecendo-a além de uma temperatura crítica. Tal fenômeno é chamado de “efeito memória de forma” e a liga que a possui é chamada de “liga com efeito memória de forma” (CAHN, 1983; VAN HUMBEECK, 1991). Ou seja, nos materiais convencionais, quando se ultrapassa o limite de escoamento, ao se retirar a carga aplicada, o material apresentará uma deformação permanente da rede cristalina, traduzida pela mudança macroestrutural da forma. Porém, nas ligas com efeito memória de forma, ocorre regressão das dimensões iniciais após a deformação plástica, como ilustrado na Figura 1.

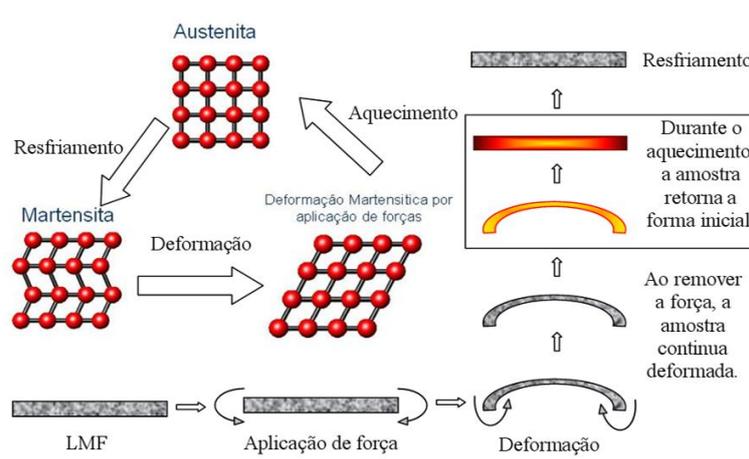


Figura 1. Efeito de Memória de Forma num elemento de LMF.

O efeito memória de forma simples (EMFS) é a capacidade que as LMF possuem de recuperarem uma deformação “aparentemente plástica” através de um aquecimento simples acima de uma temperatura crítica (OTSUKA e WAYMAN, 1998). Este fenômeno está associado à transformação da fase martensítica termoelástica para a fase austenítica. A deformação é induzida na fase martensítica, abaixo da temperatura crítica M_f em que a liga é extremamente maleável, e recuperada com um aquecimento acima da temperatura crítica A_f em que o material inicia a mudança para a fase austenita.

Superelasticidade

A superelasticidade é também conhecida como pseudoelasticidade e essa denominação deve-se ao fato das LMF poderem sofrer uma deformação muito extensa que pode ser total ou parcialmente recuperável, também em grande extensão. Na pseudoelasticidade, o material deformado plasticamente, acima do limite de escoamento, recupera a sua forma inicial ao ser removido a carga. Assim, podemos definir a superelasticidade como sendo a propriedade termomecânica do material que permite a recuperação da forma inicial ao ser retirado o carregamento a que este esta sujeito, podendo recuperar de deformações na ordem dos 8% através da dissipação de energia em cada ciclo (Figura 2).

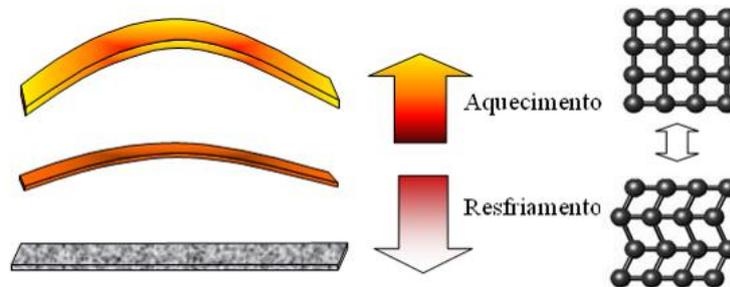


Figura 1: Esquemática do superelasticidade em uma LMF.

O fenômeno está baseado na formação de martensita induzida por tensão mecânica. A aplicação de uma tensão mecânica externa, com o material mantido a $T > A_f$, introduz energia mecânica suficiente para originar a formação de martensita a partir da estrutura austenítica. A deformação macroscópica é produzida como resultado da formação de variantes de martensita induzidas pelo carregamento mecânico. Quando a tensão é relaxada, a martensita deixa de ser a fase mais estável e se retransforma em austenita. A superelasticidade das LMF pode ser usada várias vezes, de forma cíclica, sem que o material sofra deformações plásticas permanentes ou alteração das propriedades mecânicas.

Em princípio, tanto a superelasticidade como o EMF, podem ocorrer em uma mesma amostra, dependendo da temperatura do ensaio e da história termomecânica da liga, desde que a tensão crítica para o escorregamento de planos seja suficientemente elevada. (OTSUKA e WAYMAN, 1998). A grande diferença entre a superelasticidade e a elasticidade deve-se ao fato de na ultima, a descarga seguir o mesmo caminho da carga, enquanto que na superelasticidade os caminhos de carga e descarga não são os mesmos, devido a alternância de fases austenítica/martensítica em que é gerado um ciclo de dissipação, permitindo assim dissipação de energia sem deformação final.

Modelagem de Sistemas Estruturais

Equações de movimento de sistemas com dois graus de liberdade

Considere o sistema massa-mola viscosamente amortecido com dois graus de liberdade (Figura 3). O movimento é descrito completamente pelas coordenadas $x_1(t)$ e $x_2(t)$, que definem as posições das massas m_1 e m_2 em qualquer tempo t em relação às respectivas posições de equilíbrio. As forças externas $F_1(t)$ e $F_2(t)$ agem sobre as massas respectivamente.

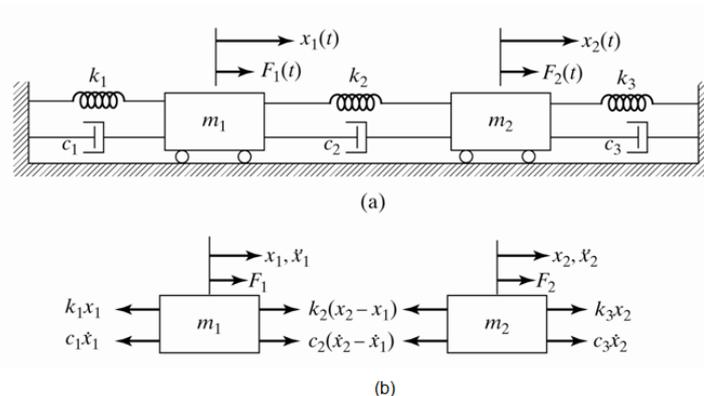


Figura 3. Sistema massa-mola-amortecedor com dois graus de liberdade.

A aplicação da segunda lei de Newton a cada uma das massas resulta em:

$$m_1\ddot{x}_1 + (c_1 + c_2)\dot{x}_1 - c_2\dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2x_2 = F_1 \quad (1)$$

$$m_2\ddot{x}_2 - c_2\dot{x}_1 + (c_2 + c_3)\dot{x}_2 - k_2x_1 + (k_2 + k_3)x_2 = F_2 \quad (2)$$

As Eqs. (1) e (2) representam as equações diferenciais que descrevem o movimento das massas m_1 e m_2 , respectivamente. Então, a equação geral do movimento é dada por um conjunto de duas equações diferenciais acopladas que podem ser escritas na forma matricial como:

$$[m]\ddot{x} + [c]\dot{x} + [k]x = F \quad (3)$$

Onde $[m]$, $[c]$ e $[k]$ são as matrizes massa, amortecimento e rigidez, respectivamente e são dados por:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Equações de movimento de sistemas com n graus de liberdade

Os sistemas modelados em engenharia estrutural, na sua grande maioria, compreendem sistemas com n graus de liberdade, embora existam sistemas facilmente representáveis por apenas um ou dois graus de liberdade. Para a análise dinâmica baseada na análise modal clássica, pretende-se determinar as frequências naturais e os modos de vibração (SAAVEDRA, 1991).

Assumindo um comportamento elástico dos elementos constituintes da estrutura considerada com n graus de liberdade, de uma forma generalizada, a equação de equilíbrio dinâmico do sistema, em um determinado instante de tempo, é dada pelo somatório de forças de inércia, de amortecimento e de restituição elástica, como representada pela Equação (RAO, 2008):

$$[m]\ddot{\vec{X}}(t) + [c]\dot{\vec{X}}(t) + [k]\vec{X}(t) = \vec{F}(t) \quad (7)$$

Onde as matrizes: $[m]$ é a matriz de massa dos elementos constituintes; $[c]$ é a matriz de amortecimento viscoso representando o fator de proporcionalidade entre a velocidade e a força de amortecimento, e as forças de restituição elástica são proporcionais a rigidez do sistema, que é dada pela matriz $[k]$, dadas por

$$[m] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

No caso específico de estruturas com solicitação externa de natureza sísmica, o vetor de força $\vec{F}(t)$ pode ser dado por uma equação específica que considere uma excitação na estrutura (SAAVEDRA, 1991).

Uma vez que as excitações impostas na estrutura podem ser de caráter harmônico, periódico ou transitório, pode não existir uma solução analítica geral para o sistema de equações diferenciais. Assim, a análise teórica torna-se possível pela aplicação de métodos numéricos e a modelação experimental surge como uma ferramenta importante, não só por contribuir para a validação dos modelos analíticos como também para o esclarecimento de certos efeitos cuja modelação analítica é mais complicada ou inexistente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais e Modelo Estrutural (2 GDL)

Como dispositivo de testes foi adotada uma estrutura que representa um modelo de edifício de dois pavimentos, conforme ilustrado na Figura (4a), formando um sistema massa-mola de dois graus de liberdade (2 GDL), representados pelas massas e rigidezes na Figura (4b).

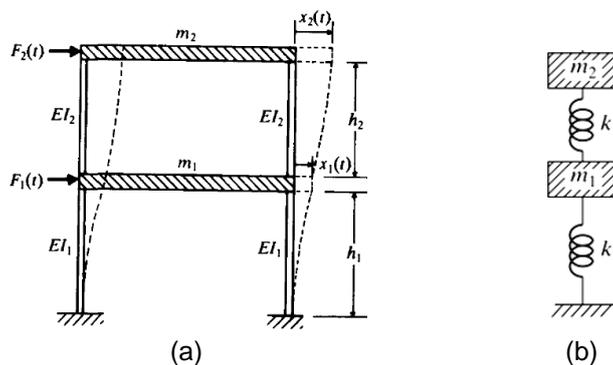


Figura 4 – (a) Representação de edifício com dois pavimentos. (b) Modelo idealizado (2 GDL).
(Fonte: RAO, 2008).

Para a montagem dos elementos da estrutura projetada (Figura 5a), utilizou-se perfis retangulares de chapas em aço comum que representam os pisos e as colunas, e foram usadas cantoneiras como elemento intermediário com fixação feita por parafusos. Para a verificação da resposta pela mudança na rigidez do sistema foi adicionado em cada pavimento, fios flexíveis de níquel-titânio dispostos diagonalmente entre as colunas da estrutura, conforme ilustra a Figura 5b.

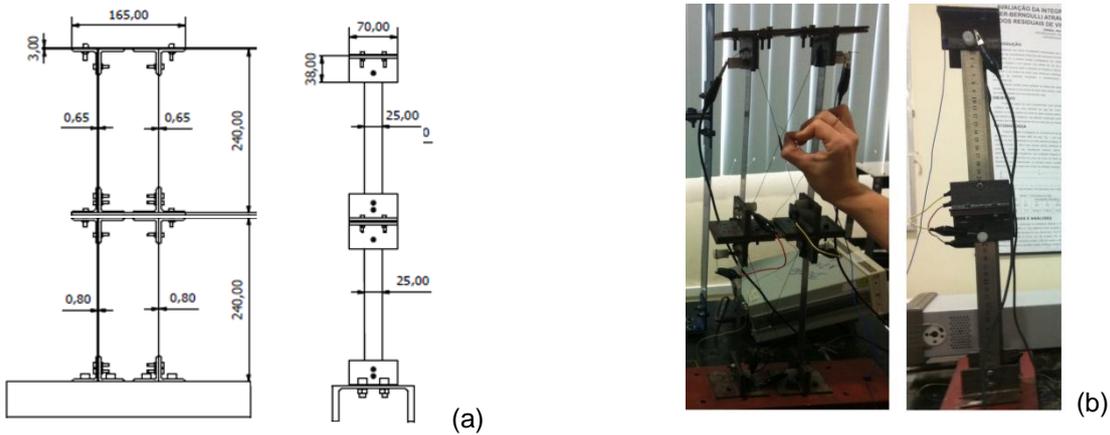


Figura 5 – (a) Desenho com dimensões (mm). (b) Dispositivo com elementos de aço estrutural.

Considerando o sistema não amortecido sob vibração livre, e aplicando-se um determinado nível de energia ao sistema sob a forma de deslocamentos iniciais ou forças de impacto, obtém-se:

$$[m]\ddot{\vec{X}}(t) + [k]\vec{X}(t) = 0 \quad (11)$$

Admitindo uma solução da forma:

$$x_i(t) = X_i T(t) \quad (12)$$

Onde X_i é uma constante, T é uma função harmônica no tempo t e $i = 1, 2, \dots, n$, e procedendo uma manipulação algébrica, obtém-se a Equação (7) que representa o problema de autovalores:

$$[[k] - \omega_i^2 [m]]\vec{X}_i = 0 \quad (13)$$

A Eq. (13) é denominada equação característica, onde ω_i^2 é conhecido como autovalores e \vec{X}_i os autovetores, com modos de vibração associados às frequências naturais do sistema, ω_i .

A solução não trivial do sistema homogêneo é obtida quando o determinante da Eq. (13) deve ser nulo,

$$|[k] - \omega_i^2 [m]| = 0 \quad (14)$$

Resolvendo a Eq. (14), obtêm-se

$$\Delta = |\lambda [I] - [D]| = 0 \quad (15)$$

Onde $\lambda = \omega_i^{-2}$, $[I]$ é a matriz identidade e $[D] = [k]^{-1} [m]$ é a matriz dinâmica.

Concepções do sistema de excitação

Baseado na estrutura construída (Figura 5), e após sua montagem, esta deveria ser fixada em uma base metálica móvel e ser submetida a uma excitação na base de modo a simular no conjunto uma vibração forçada numa dada faixa de frequência considerada. Após o estudo de diversos mecanismos que poderiam excitar o conjunto pela base da estrutura, duas formas de acionamento foram propostas: a primeira utilizando um mecanismo do tipo biela manivela, e a segunda um acionamento realizado com uma mesa linear composta de um fuso com *driver* e guias lineares.

Sistema biela manivela

Um mecanismo típico de movimento biela-manivela é representado esquematicamente na Figura 6, cujo movimento circular contínuo da barra r é convertido pela biela L em movimento retilíneo do cursor.

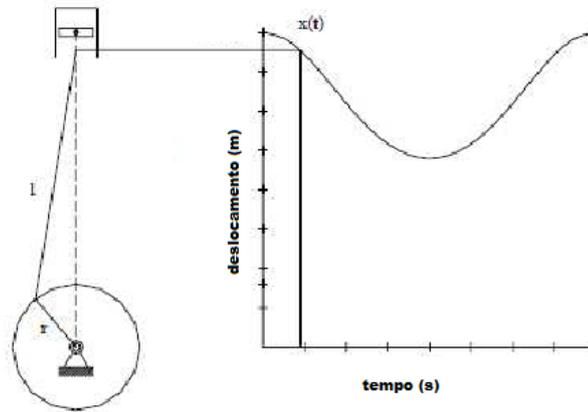


Figura 6 - Representação esquemática do sistema biela manivela.

Nos mecanismos biela manivela de uso corrente, o comprimento da biela é cerca de 4 vezes superior ao raio da manivela, ou seja, $R/L \leq 1/4$, isto confere um movimento aproximadamente harmônico, isto é, tomando como referência o centro da amplitude do pistão, este se desloca conforme a função senoidal $x(t)$.

Porém as funções de velocidade e aceleração apresentam uma segunda harmônica, no qual, o seu valor depende da relação entre a biela e manivela, e essa influencia da segunda harmônica no sistema, irá deformar a resposta principalmente da aceleração conforme ilustra a Figura 7.

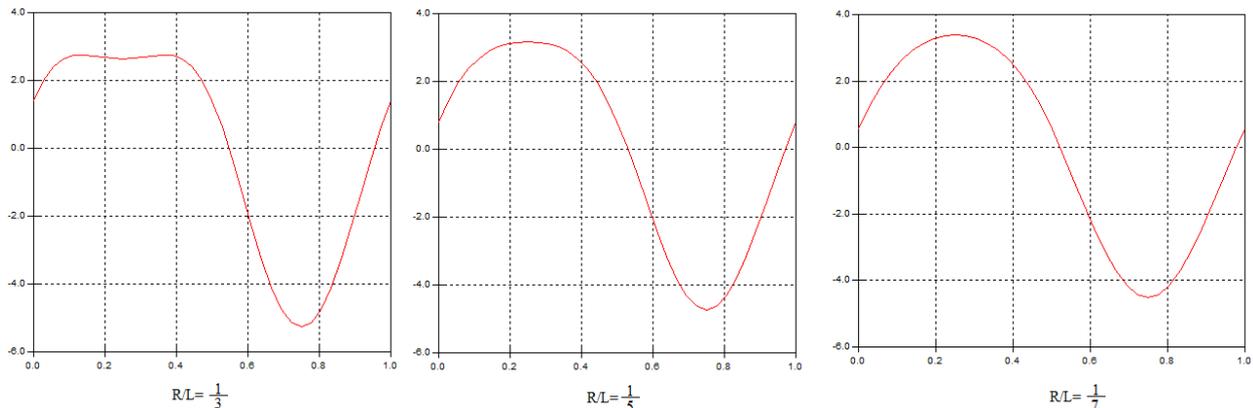


Figura 7 – Resposta em aceleração de mecanismo biela manivela com a variação de R/L .

Sistema de mesa linear com fuso e guias lineares

Esse tipo de mecanismo transforma o movimento de rotação do motor de passo em um movimento linear. O sistema é composto de fusos de esferas, mancais, guias lineares, patins e um motor *driver*. É um dispositivo de maior precisão de movimento e é usado em máquinas para transformar o movimento angular em movimento linear (Figura 8).

O fuso de esferas deveria ser o empregado nesse sistema pelo fato deste proporcionar posicionamento mais preciso, maior vida útil, baixo atrito, menor potência de acionamento, maior rendimento mecânico, menor aquecimento e maior velocidade de deslocamento. Tais características seriam predominantes para a escolha desse tipo de sistema de excitação da estrutura. Porém, o custo desse sistema é bem mais elevado e necessitaria de um sistema de controle e ajuste das frequências mais complexo.

Portanto, diante dessas dificuldades de montagem e instrumentação dessa segunda concepção, optou-se em analisar a estrutura apenas com excitação do tipo transiente, realizada com um kit martelo de impacto existente no Laboratório de Vibração e Instrumentação - LVI/UFCG.

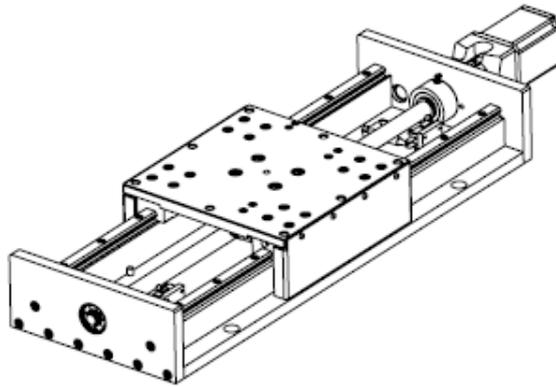


Figura 8 – Projeto de mesa linear (Kalatec Máquinas).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Simulação do modelo teórico

A partir das Eqs. (11) a (15), desenvolveu-se uma rotina computacional no ambiente Matlab, que permite calcular as frequências naturais e modos de vibração. A Tabela 1 mostra os parâmetros materiais utilizados tanto para os resultados teóricos quanto experimentais. Os valores calculados de momento de inércia e rigidez equivalente das colunas foram obtidos de tabelas da literatura de resistência dos materiais (BEER & JOHNSTON, 2006).

Tabela 1 – Parâmetros materiais.

Parâmetros	1º piso	2º piso
Massas (m_1 e m_2)	1,33 kg	0,81 kg
Momento de inércia (I_{o1} e I_{o2})	$1,08 \times 10^{-12} \text{ m}^4$	$5,93 \times 10^{-13} \text{ m}^4$
Rigidez equivalente (k_{eq1} e k_{eq2})	1053,03 N/m	580,51 N/m

Resolvendo a Eq. (15) com os dados da Tabela 1, obteve-se as frequências naturais e modos de vibração do sistema conforme a Tabela 2 e Figura 9. Observa-se que na primeira configuração (modo 1), referente à primeira frequência natural, o deslocamento é máximo no piso superior, enquanto que na segunda configuração (modo 2) o deslocamento é máximo no piso inferior.

Tabela 2 – Parâmetros modais.

Frequências naturais	Simulação computacional
f_1	3,35 Hz
f_2	6,85 Hz

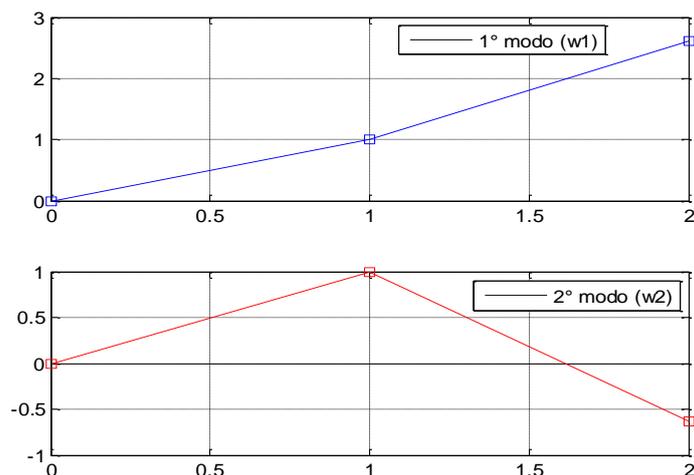


Figura 9 – Representação dos modos de vibração.

Resultados de análise experimental

A análise experimental consistiu em obter gráficos de resposta de vibração no tempo e em frequência quando a estrutura era impactada com martelo instrumentado para duas condições: sem fios LMF (estrutura original) e com atuador LMF (estrutura treliçada).

A Figura 10 ilustra as respostas em vibração na condição original da estrutura (sem atuador), visando-se ter um referencial com o modelo teórico. Na Figura (10a), observa-se que o perfil da resposta decai em forma logarítmica. A Figura (10b) mostra o espectro de resposta em frequência onde se observa os dois picos que indicam, respectivamente, a 1ª e a 2ª frequência natural ($f_1 = 3$ Hz e $f_2 = 6,34$ Hz). Comparando com a Tabela 2, nota-se uma boa concordância dos resultados em relação ao modelo computacional.

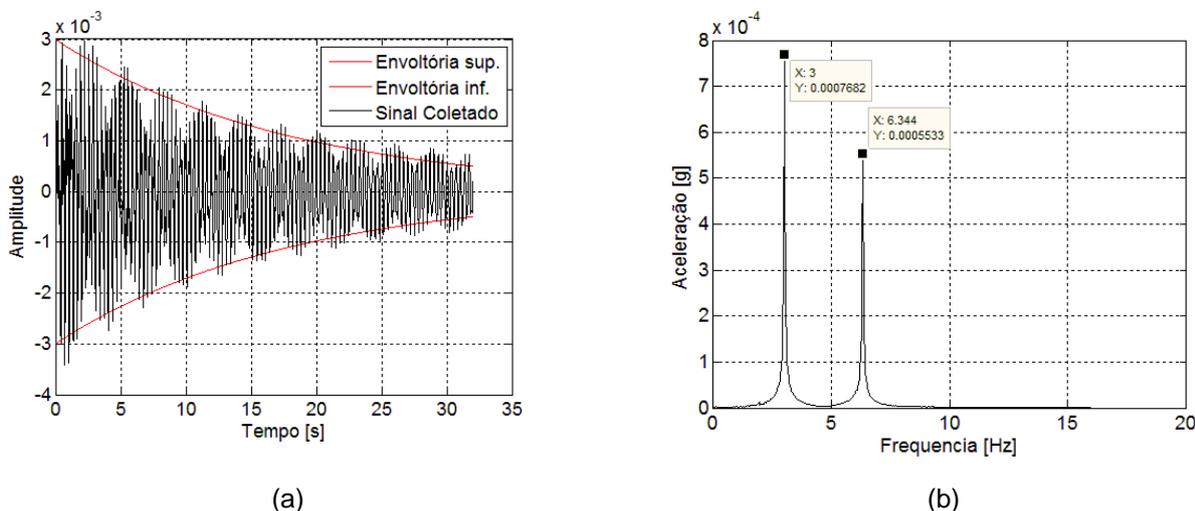


Figura 10 – Resposta do sistema (sem atuador). (a) Resposta no tempo. (b) Espectro em frequência.

A Figura 11 mostra os gráficos de resposta em vibração livre do sistema com a incorporação dos fios LMF à temperatura ambiente. Pela Figura (11a), observa-se que a resposta apresenta uma rápida atenuação, após 4 segundos, em relação à Figura (10a), devido ao amortecimento introduzido pelos fios LMF. Na Figura (11b), observa-se no espectro um aumento significativo nos valores das frequências naturais ($f_1 = 7,87$ Hz e $f_2 = 17,63$ Hz), devido ao aumento significativo da rigidez do sistema.

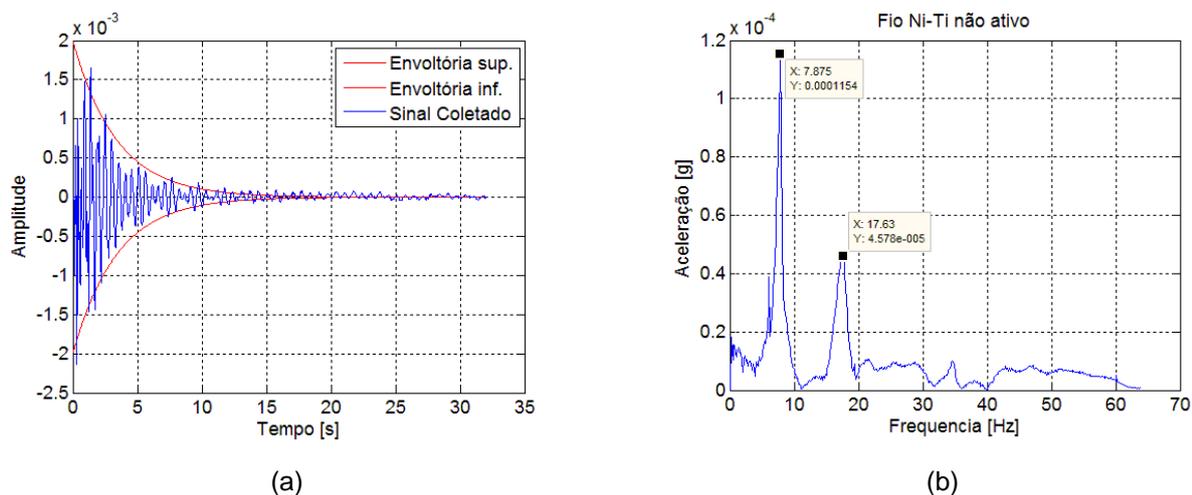


Figura 11 – Resposta do sistema (com atuador LMF). (a) Resposta no tempo. (b) Espectro em frequência.

CONCLUSÃO

A modelagem analítica do dispositivo projetado utilizando rotinas no Matlab foi capaz de prever o comportamento dinâmico da estrutura de 2 GDL, sem considerar a incorporação do elemento de fio LMF. Com os parâmetros de rigidez e amortecimento, foi possível obter os parâmetros relacionados a frequência natural e modos de vibrar com boa precisão.

Por outro lado, os resultados experimentais do sistema quando incorporado os fios LMF na forma treliçada, implicou num acréscimo em torno de 7,4% para a 1ª frequência natural e de 15,6% para a 2ª frequência natural, mostrando que os fios LMF apresentam um bom potencial de aplicação no controle de vibrações para o protótipo considerado.

Para explorar o potencial do uso de elementos de Ni-Ti e uma validação da análise aqui apresentada, um estudo mais aprofundado sobre o tema e a proposta de um modelo matemático mais complexo para o fenômeno deve ser realizado para ganhar maior consistência e validação do modelo.

Embora o sistema de excitação pela base tenha sido delineado na proposta original, e duas concepções apresentadas com as especificações, dificuldades de aquisição e o pouco tempo para a conclusão do projeto impediram a obtenção desses resultados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

Ao Laboratório de Vibração e Instrumentação (LVI) e ao Laboratório de Materiais Metálicos e Estruturas Ativas (LAMMEA) da UAEM/UFMG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENALCAZAR-SAAVEDRA, F. L. **Estudo Comparativo em Análise Sísmica de Estruturas de Edifício**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 1991.
- BEER, F. P. & JOHNSTON, E. R. **Resistência dos Materiais**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Makron Books, 1995.
- DA SILVA, N. J. **Estudo do Comportamento Termomecânico de uma Liga NiTi com Memória de Forma Usando Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande: Campina Grande-PB, 2009.
- LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Application**. Edited by Lagoudas, D. C., Springer, Texas, USA, 2008.
- FUGAZZA, D. **Shape-Memory Alloys Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modelling and Numerical Simulations**. Dissertation (Master of Earthquake Engineering), Università degli Studi di Pavia: Pavia, 2003.
- LAGOUDAS, D.C., 2008. **Shape Memory Alloys**. Springer Science Business Media.
- MAVROIDIS, C., 2007. **A Study on the Thermomechanical Properties of Shape Memory Alloys**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 18: pp 11- 18.
- MOUTINHO, C. M. R. **Controlo de Vibrações em Estruturas de Engenharia Civil**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, 2007.
- OLIVEIRA, B. A. **Desenvolvimento de um Isolador de Vibração Pseudoelástico**. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas), Universidade de Brasília: Brasília, 2008.
- OLIVEIRA, H. M. R.; GRASSI, E. N. D; ARAÚJO, C. J. **Smart Lockwire: Fio de Freno de Liga com Memória de Forma para Melhoria de Confiabilidade em Fixações Aparafusadas**. VII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2012, São Luiz – MA.
- RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4ª Edição. São Paulo: Pearson–Prentice Hall, 2008.
- RUZICKA, J.E. **Fundamental Concepts of Vibration Control, Sound and Vibration**, v.5, 1971, p. 16-22
- SILVA, T. M. O. **Avaliação da Transmissão de Vibração num Edifício Existente**. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa: 2010.
- VAN HUMBEECK, J. CHANDRASEKARAN, M. & DELAEY, L. **Shape Memory Alloys: materials in action**. Endeavour. v.15, n.04, p. 148-54, 1991