



## MODELAGEM NUMÉRICA DE UMA ESTRUTURA DE DOIS ANDARES AMORTECIDA COM FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO

### Thiago Correia Neves

Departamento de Engenharia Mecânica – GMSINT (Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes)  
UNESP/FEIS - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Av. Brasil nº56, centro, CEP 15385-000 endereço  
teneves@aluno.feis.unesp.br

### Eduardo Fontes Paschoal

efpaschoal@dem.feis.unesp.br

### Camilo Mesquita Neto

camilomn@dem.feis.unesp.br

### Vicente Lopes Júnior

vicente@dem.feis.unesp.br

**Resumo:** *A cada dia a exigência em projetos de engenharia é maior. Sistemas de atenuação de vibrações cada vez menores, mais baratos e mais eficientes são necessários. A atenuação semi-ativa é uma das soluções propostas atualmente para se conseguir tais metas. Este trabalho compreende a parte inicial de um estudo que visa uma atenuação semi-ativa com amortecimento variável utilizando fluido magnetoreológico em uma estrutura de dois andares. Apresenta-se um modelo numérico, através da teoria de elementos finitos utilizando o programa comercial ANSYS, da mesa de testes que simula uma estrutura de dois andares. A mesa de testes foi modelada a partir de elementos de viga e de placa, possuindo ainda um elemento que simula o amortecimento resultante da viscosidade do fluido MR. A solução modal apresenta as vinte e quatro primeiras frequências naturais da estrutura. As duas primeiras são de modos globais e podem ser aproximados por um sistema mola-massa, possuem frequências baixas em relação aos demais modos que são modos locais da viga e da placa. Durante a solução harmônica, variou-se o coeficiente de amortecimento, simulando mudanças no campo magnético aplicado no fluido MR, e se observou a suavização das curvas de amplitude por frequência excitadora, diminuindo, assim, a amplitude de resposta. As duas primeiras frequências naturais foram comparadas com testes experimentais feitos em outro trabalho.*

**Palavras-chave:** modelagem fluido MR, atenuação de vibrações, fluido magnetoreológico, elementos finitos.

## 1. INTRODUÇÃO

Quando se refere a engenharia moderna, que compreende a proposição de projetos complexos, a área de vibrações assume um papel de suma importância. Excitações externas e internas estão presentes em todos os tipos de estruturas e máquinas, e cabe ao engenheiro minimizar seus efeitos sobre estas.

Grandes estruturas como prédios e pontes estão a mercê de ventos e terremotos que podem comprometer a segurança e até condenar a construção. Veículos, por exemplo, estão submetidos a uma gama muito maior de excitações. Seus próprios motores causam vibrações e ruído que precisam ser controlados para se garantir o conforto, a segurança e a estabilidade (Moura, 2003). Imperfeições na pista de rodagem e o aumento contínuo de velocidade média criam a necessidade de se utilizar suspensões mais eficientes. Em aviões e helicópteros o fator peso influencia muito na escolha do sistema de atenuação de vibrações. Somam-se isto tudo com a competição industrial, onde, além da eficiência e da confiabilidade, o custo entra como determinante em um projeto que estará na linha de montagem.

Ainda hoje, o tipo de atenuação mais utilizado é a passiva. Isto se deve principalmente a simplicidade de implementação e o baixo custo. A atenuação passiva só é capaz de “roubar” energia do sistema e atua em uma faixa limitada de frequências (Lima and Rade, 2002). Pode ter várias configurações, como somente um elemento elástico, um elemento elástico junto com um de amortecimento viscoso ou até um elemento elástico e uma massa (Yilmaz and Kikuchi, 2006). Em sistemas que sofrem alterações em função das condições de utilização, este método é limitado e pode se tornar inadequado.

Devido a esta necessidade de maior eficiência na atenuação, formas de contornar as limitações dos atenuadores passivos foram desenvolvidas. Uma delas é a atenuação ativa. Esta é capaz de introduzir energia no sistema, a fim de reduzir vibrações, através de um atuador. Tal método apresenta grande eficiência e grande faixa de atuação. Isto se deve ao controle em tempo real feito computacionalmente, garantindo que o sistema esteja otimizado para cada tipo de excitação. Estas vantagens resultam em custos. Além de uma grande quantidade de energia ser necessária para o funcionamento, há uma grande exigência computacional e de tecnologia de precisão para a implementação. Tais fatores encarecem e limitam o projeto a alguns tipos de aplicações práticas, como na área aeronáutica (Fei, 2006).

A atenuação de vibrações semi-ativa pode ser considerada um método intermediário entre os dois anteriormente apresentados. Esta é amplamente estudada devido a vantagens como pequena necessidade de energia e grande faixa de atuação. Neste método algumas propriedades do atenuador podem ser modificadas para se adequar ao tipo de excitação, porém sem a introdução de energia no sistema (Liu and Liu, 2006). Normalmente, esta propriedade pode ser obtida através da utilização de materiais inteligentes, que é fruto de diversos estudos e interesse atualmente.

Materiais inteligentes são aqueles capazes de modificar suas propriedades em função de um estímulo externo. Encontramos diversos tipos de materiais inteligentes presentes na engenharia prática, podendo-se citar: ligas de memória de forma; materiais piezelétricos; fluidos eletroreológicos e magnetoreológicos. As ligas de memória de forma podem voltar a sua forma original através de um estímulo externo depois de deformadas (Khan, 2004). Encontram aplicação na área de atenuação, mas apresentam sérias limitações de temperatura de trabalho e lentidão de resposta. Materiais piezelétricos são amplamente utilizados, tanto como atuadores como sensores. Isto se deve às propriedades especiais do material. Quando deformado por uma força externa ele cria uma diferença de potencial elétrico que pode ser medido (sensor). O contrário também ocorre, quando se aplica uma diferença de potencial no material ele se deforma, criando uma força. Limita-se sua utilização a casos onde as forças atuantes devem ser pequenas, pois possui grande fragilidade. Fluidos eletroreológicos (ER) e magnetoreológicos (MR) mudam seu comportamento de fluido Newtoniano para Bingham através da aplicação de campos elétrico e magnético, respectivamente. Diversos estudos sobre controle semi-ativo de vibrações utilizando fluido MR tem sido relatados recentemente na literatura. Os fluidos magnetoreológicos apresentam vantagens sobre os eletroreológicos, como a menor necessidade de energia, maior força de atuação, maior faixa de temperaturas de trabalho e menor possibilidade de contaminação.

Neste trabalho o foco estará voltado para a atenuação semi-ativa com amortecimento variável, utilizando-se o fluido magnetoreológico.

## 2. CONCEITOS BÁSICOS E DETERMINAÇÕES NUMÉRICAS DAS PROPRIEDADES DA MESA DE TESTES

Nesta seção, trata-se das propriedades do fluido MR e dos atenuadores semi-ativos com amortecimento variável. O objetivo futuro do trabalho é uma proposta de controle baseado na atenuação semi-ativa com amortecimento variável em uma mesa de testes, no entanto aqui se apresenta somente a modelagem numérica da estrutura. Será determinado o modelo numérico da mesa de testes baseado na teoria de elementos finitos utilizando-se o programa comercial ANSYS, simulando os efeitos de uma variação do amortecimento.

### 2.1 Fluido Magnetoreológico

Os fluidos magnetoreológicos (MR) foram descobertos no final da década de 40. Jacob Rabinow reportou um programa experimental de fluido MR na US Bureau of Standards em 1948 e Winslow publicou seu programa de pesquisa investigando as propriedades e aplicações do fluido ER em 1949. O fluido eletroreológico (ER) obteve mais destaque por algum tempo, mesmo que inicialmente apresentasse problemas como temperatura de trabalho limitada e dificuldade de armazenamento que foram superados através de estudos mais profundos. Porém, este destaque passou para o fluido MR devido a vantagens visíveis, como a menor necessidade de energia, maior resistência a tensões, maior faixa de temperaturas de trabalho e menor suscetibilidade a contaminações, condenando o uso de fluido ER em aplicações práticas e comerciais (Stelzer, 2002).

As propriedades dos fluidos MR que o caracterizam como material inteligente se devem a sua composição química. Eles são compostos por partículas magnéticas em suspensão num fluido inerte que quando atravessado por um campo magnético tais partículas se alinham em concordância com o fluxo magnético, formando um campo de tensões quase que instantaneamente. Esta rapidez de alinhamento, da ordem de poucos milisegundos, permite a utilização do fluido MR em aplicações em tempo real.

A composição química dos fluidos MR podem variar muito conforme a necessidade de projeto. Geralmente utiliza-se pó ferromagnético, com diâmetros da ordem de 0,05 a 10 microns, em uma proporção de 20% a 40% em volume. Fluidos inertes como óleo mineral, água ou a base de silicone são amplamente utilizados na obtenção do fluido. Aditivos surfactantes e tixotrópicos são necessários para impedir ou retardar a agregação e sedimentação das partículas magnéticas melhorando assim o desempenho e a vida útil (Bombard et al, 2006).

O alinhamento das partículas magnéticas em concordância como campo magnético, como mostra a Figura 1, cria um campo de tensões que se opõe às tensões cisalhantes criadas externamente ao fluido.

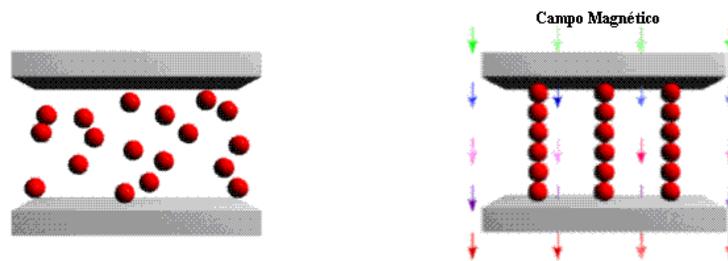


Figura 1 : Alinhamento das partículas magnéticas sob a ação de um campo magnético.

Tal campo de tensões pode ser anulado na mesma velocidade que aplicado, controlando-se sua intensidade. Este controle é feito através da intensidade do campo magnético aplicado. A Figura 2 mostra uma curva característica da variação do campo de tensões em função da intensidade do campo magnético (H) (Koo, 2003).

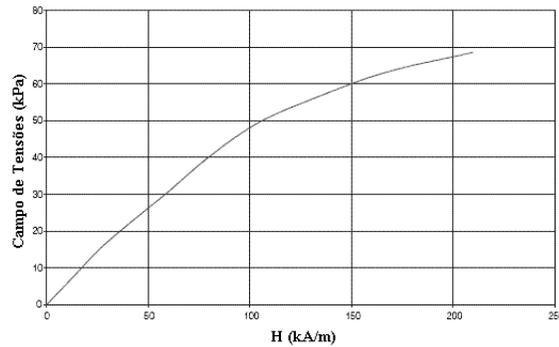


Figura 2 :Tensão x intensidade de campo magnético de um fluido MR comercial a base de água.

O comportamento do fluido MR livre de campo magnético pode ser descrito como Newtoniano, isto é, a taxa de deformação é proporcional à tensão de cisalhamento na proporção da viscosidade, como mostra o Figura 3.

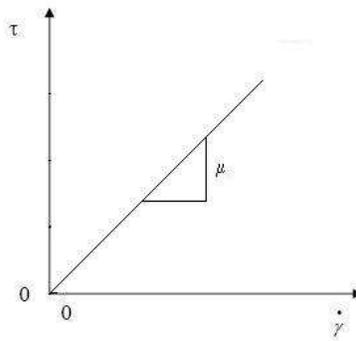


Figura 3 : Tensão por taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) em um fluido Newtoniano.

A relação tensão pela taxa de deformação do fluido Newtoniano pode ser modelada matematicamente da seguinte forma:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação do fluido.

Quando o fluido MR é atravessado por um campo magnético um campo de tensões se forma e precisa ser vencido para que ocorra deformação. Assim, o comportamento do fluido muda para o modelo de Bingham. Este modelo difere do Newtoniano devido à necessidade de uma tensão mínima, a tensão de escoamento, para que se inicie uma taxa de deformação proporcional à tensão, semelhante ao primeiro caso. Sua modelagem matemática pode ser descrita da seguinte forma:

$$\tau = \tau_y(H) + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2)$$

onde  $\tau_y$  é a tensão de escoamento e H é a intensidade do campo magnético.

Nesta modelagem a tensão de escoamento varia em função da intensidade do campo magnético, assim como no fluido MR. A Figura 4 mostra esta relação para vários valores de H.

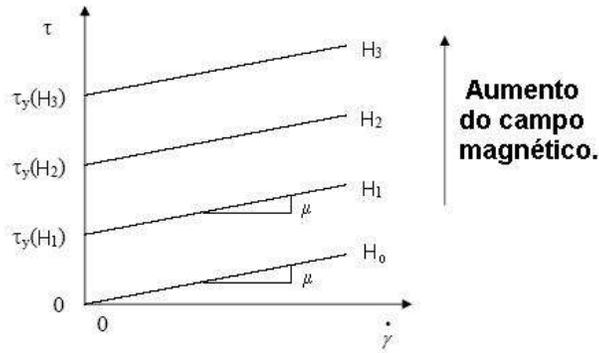


Figura 4 : Relação entre a intensidade do campo magnético e a tensão de escoamento.

## 2.2. Absorvedores Semi-ativo com Amortecimento Variável

Sistemas passivos de atenuação de vibrações apresentam limitações de desempenho. Por possuírem propriedades constantes como rigidez, amortecimento e massa, são limitados a absorver uma pequena faixa de frequências e transmitir forças somente na intensidade a que foram projetados. A fim de melhorar a resposta dos atenuadores a um custo de implementação e de energia menor que o sistema ativo, o sistema semi-ativo foi idealizado. Neste sistema, algumas de suas propriedades podem ser modificadas em resposta a estímulos como posição e velocidade para se adaptar a excitação e ganhar em atenuação.

Sistemas semi-ativos não necessitam de grandes fontes externas de energia, podendo operar com baterias, o que garante maior autonomia e segurança. Atenuadores de grandes estruturas como prédios estão a mercê de falta de energia durante terremotos, justamente no momento em que seriam mais importantes. Isto demonstra a liberdade e a confiabilidade de tais sistemas se presentes em estruturas onde a segurança deve predominar.

Atenuadores semi-ativos com amortecimento variável são, nada mais nada menos que, atenuadores passivos viscosos com a capacidade de alterar seu amortecimento. Tal variação pode ser feita controlando-se mecanicamente a dimensão do orifício por onde escoo o fluido de amortecimento ou atuando diretamente nas propriedades viscosas do fluido. Esta última possibilidade só pode ser implementada através da utilização de fluidos especiais capazes de alterar suas propriedades com estímulos externos. Os fluidos eletroreológicos e magnetoreológicos podem ter suas propriedades reológicas, como o próprio nome diz, controladas a partir de campos elétricos e magnéticos, respectivamente. Assim, podemos encontrar uma relação entre corrente elétrica e amortecimento, necessária na confecção de tais atenuadores.

Antes de criar um atenuador semi-ativo devemos estabelecer critérios de amortecimento. É importante levar em consideração outros aspectos além da integridade estrutural e estabilidade dinâmica no controle de vibrações. O conforto humano é um fator tão primordial na decisão das frequências, amplitudes e forças transmitidas por um atenuador como os aspectos citados anteriormente.

O conforto humano dentro de um veículo está diretamente relacionado com as forças transmitidas. Quanto maior o amortecimento, mais isolado estará o passageiro de excitações de baixa frequência, minimizando a quantidade de energia transmitida. Porém, para se obter uma grande estabilidade veicular necessita-se de um menor amortecimento, o que promove uma absorção maior de excitações de alta frequência e maior transmissão de baixas frequências. Assim, podemos observar que os interesses então em contradição, para se obter conforto a estabilidade deve diminuir. Portanto, para se obter um amortecimento “ideal”, maior estabilidade e conforto, utiliza-se do controle do amortecimento para se obter diferentes respostas para diferentes excitações (Gonçalves, 2001).

## 2.3. Modelagem e Resultados Numéricos da Mesa de Testes por Elementos Finitos

A mesa de testes, apresentada na Figura 5, foi confeccionada de modo a apresentar os dois primeiros modos de vibrar com frequências naturais de uma ordem de grandeza bem mais baixa que o restante dos modos, para que modos de placa e de viga não interfiram nos resultados. Isto é evidenciado na solução modal do modelo numérico que será apresentado.



Figura 5 : Mesa de testes para aplicação do fluido MR.

O amortecimento será aplicado na estrutura mergulhando-se um pêndulo engastado no primeiro patamar em um recipiente contendo o fluido MR.

### 2.3.1. Aproximações Adotadas na Modelagem

Durante a modelagem foram adotados elementos de viga para as escalas de aço inox e para o pêndulo, especificando-se cada propriedade geométrica e do material de cada parte. Cada viga foi dividida em dez elementos de igual dimensão. Os patamares, inferior e superior, foram adotados como placas, sendo estes, divididos em sessenta e quatro e trinta e seis elementos, respectivamente, de igual tamanho. Novamente, as propriedades geométricas e do material foram adotados para cada placa o mais próximo da mesa real. A Figura 6 mostra o modelo final.

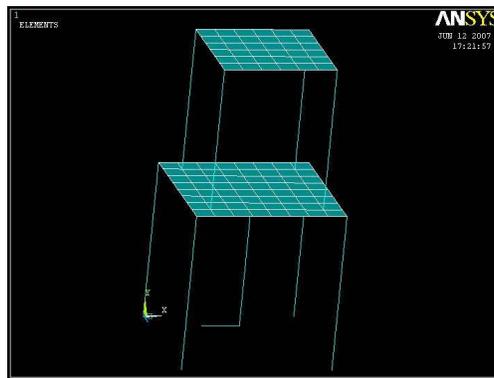


Figura 6 : Modelo matemático da estrutura no ANSYS.

Os pontos de contato de cada elemento com outro foram acoplados, impedindo qualquer grau de liberdade de um em relação ao outro. As extremidades inferiores das quatro vigas inferiores, que representam as escalas de aço inox, foram fixadas de modo que restringisse qualquer tipo de movimento, engastando assim os elementos como na mesa real.

Na extremidade do elemento de viga que representa o pêndulo engastado foi acoplado um elemento de amortecimento, fixo em sua outra extremidade como se estivesse engastado. Este elemento representa o amortecimento causado pela viscosidade do fluido MR em função do movimento do pêndulo em seu interior. A Figura 7 mostra os acoplamentos e restrições de movimento.

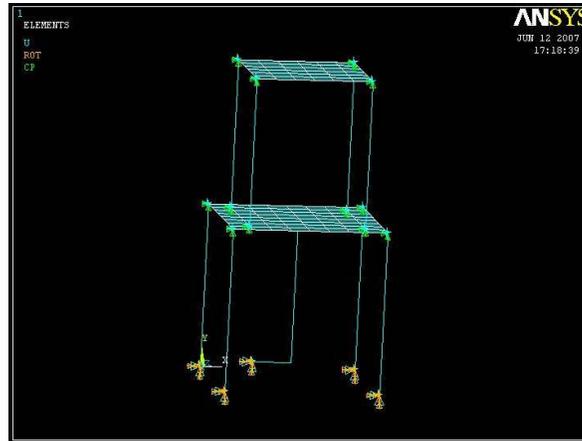


Figura 7 : Restrições de movimento e acoplamentos.

## 2.4. Solução Modal

Na solução modal se encontrou as frequências naturais da estrutura e explicitando-se seus modos de vibrar. Como era esperado, os dois primeiros modos de vibrar apresentaram-se na forma da aproximação duas massas e duas molas, como mostra a Figura 8. Os patamares se aproximam de duas massas concentradas e as escalas atuam como molas. O primeiro modo se caracteriza pelas massas estarem em fase no movimento, e o segundo modo por estarem defasadas  $180^\circ$ .

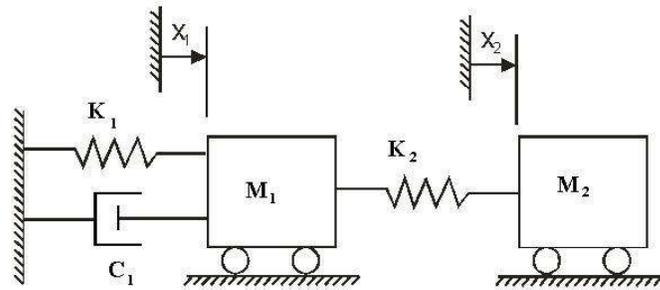


Figura 8 : Aproximação duas massas e duas molas da mesa de testes.

A solução encontrou vinte e quatro frequências naturais até a frequência de 300Hz, a Tabela 1 mostra os dez primeiros modos e suas respectivas frequências naturais. Os dois primeiros modos apresentam frequências naturais pequenas em relação aos demais. Observando as animações dos demais modos, notou-se que são modos de viga e de placa, o que explica a alta frequência natural.

Tabela 1 : Modos de vibrar e respectivas frequências naturais.

Modos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequências Naturais [Hz]	3.7501	10.274	72.234	79.695	80.279	81.268	82.117	95.040	95.719	96.608

## 2.5. Solução Harmônica

Executada a solução harmônica, com a força excitadora agindo no primeiro patamar, foi plotada a amplitude do movimento em função da frequência da força aplicada para os dois patamares. A variação do amortecimento devido ao fluido MR sob diversas condições de campo magnético, foi simulado através da variação do coeficiente de amortecimento no elemento de amortecimento e observado as mudanças no gráfico. As Figuras 9 (a), (b), (c), (d) mostram os gráficos obtidos na solução harmônica.

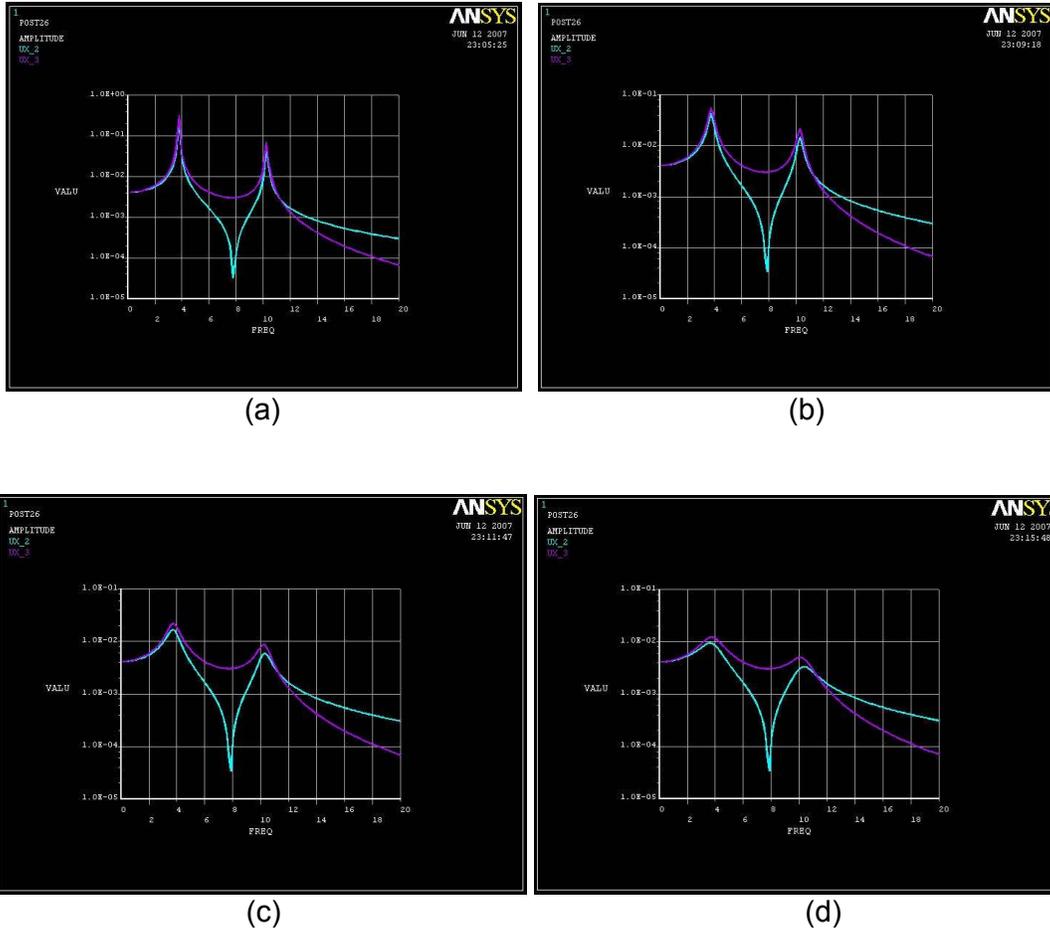


Figura 9 : Gráficos da amplitude de deslocamento pela frequência excitadora, variando de amortecimento nulo em (a) e aumentando gradativamente em (b), (c) e (d). Curva azul representa o deslocamento do primeiro patamar, e a roxa a do segundo patamar.

### 3. Verificação da Validade dos Resultados Numéricos

Notou-se a suavização da curva da amplitude com o aumento do amortecimento, como era esperado. Pode-se concluir também que os outros modos da mesa de testes não influenciam no estudo dos dois primeiros modos, que serão utilizados em trabalhos futuros. Conclui-se também que o pêndulo engastado e mergulhado no fluido pode ser considerado apenas como elemento de ligação para o fator de amortecimento no primeiro patamar, não introduzindo nenhum modo representativo, o que será útil em trabalhos futuros.

Autores do mesmo grupo de trabalho já realizaram testes experimentais na mesma mesa de testes, possibilitando uma comparação dos resultados numéricos com os experimentais. Neto et al (2006) apresentam as frequências naturais da mesa de testes para os dois primeiros modos, obtidos através de três métodos diferentes. Os próximos passos da pesquisa incluem a implementação do controlador, para o controle do campo magnético e, por conseguinte, a variação do amortecimento causado pelo fluido MR.

#### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao grupo GMSINT pela ajuda na realização do presente trabalho e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo apoio financeiro.

#### 5. REFERÊNCIAS

Bombard, Antonio José Faria; Joekes, Inés; Knobel, Marcelo. Avaliação de um fluido magneto-reológico em amortecedor protótipo, magneto-reômetro e magnetômetro. Disponível em: <<http://www.sae.org/technical/papers/>>. Acesso em: 15 out. 2006.

Fei, H.Z., Zheng, G.T., Liu, Z.G., An investigation into active vibration isolation based on predictive control, *Journal of Sound and Vibration*, vol.296, pp.195–208, 2006.

Gonçalves, F. D. Dynamic Analysis of Semi-Active Control Techniques for Vehicle Applications, Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering, August, 2001, Blacksburg, Virginia.

Khan, M. M., Lagoudas, D. C., Mayes, J. J. e Henderson, B. K., Pseudoelastic SMA Spring Elements for Passive Vibration Isolation, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, pp. 415-441, June 2004.

Koo, J. H. Using Magneto-Rheological Dampers in Semiactive Tuned Vibration Absorbers to Control Structural Vibrations, Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering July 23, 2003 Blacksburg, Virginia.

Lima, A. M. G., Rade, D. A., Estudo Analítico e Experimental de Um Absorvedor Dinâmico de Vibrações Pendular, Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, pp.1-14, 2002.

Liu, J., Liu, K., A tunable electromagnetic vibration absorber: Characterization and application, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, pp. 708–724, 2006.

Neto, C. M., Tavares, M. A., Júnior, L. V., Identificação de Parâmetros de uma Estrutura Flexível de Dois Andares Utilizando o Método de Predição de Erros, 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2006.

Moura, E. D. A. , Estudo de Suspensões Passiva, Semi-Ativa MR e Ativa, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2003.

Stelzer, G. J., A Magnetorheologic Semi-active Isolator to Reduce Noise and Vibration Transmissibility in Automobiles, Division of Research and Advanced Studies of the University of Cincinnati, in the Department of Mechanical, Industrial and Nuclear Engineering of the College of Engineering, 2002.

Yilmaz, C., N., Kikuchi N., Analysis and Design of Passive Low-pass Filter-type Vibration Isolators Considering Stiffness and Mass Limitations, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 293, pp171–195, 2006.

### MODELING OF A TWO FLOORS BUILDING USING MAGNETO-RHEOLOGIC FLUID

#### **Thiago Correia Neves**

Departamento de Engenharia Mecânica – GMSINT (Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes)  
UNESP/FEIS - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Av. Brasil n°56, centro, CEP 15385-000 endereço  
tneves@aluno.feis.unesp.br

#### **Eduardo Fontes Paschoal**

efpaschoal@dem.feis.unesp.br

**Camilo Mesquita Neto**  
camilomn@dem.feis.unesp.br

**Vicente Lopes Júnior**  
vicente@dem.feis.unesp.br

***Abstract:** Every day the requirement in engineering projects is bigger. Minors, cheaper and more efficient vibration attenuation systems are necessary. The semi-active attenuation is one of the currently solutions proposals to obtain such goals. This work is addressed a semi-active attenuation with changeable damping using magneto-rheologic fluid in a structure of two floors. A numerical model is presented, through the theory of finite elements using commercial program ANSYS. The structure was modeled using beam and shell elements, possessing an element that simulates the resultant damping of the viscosity of MR fluid. The modal solution presented the twenty and four first natural frequencies of the structure. The two first ones are global modes, that can be approached to spring-mass system with two DOF, and possess low frequency comparing with the beam and shell modes. During the harmonic solution the damping coefficient was varied, simulating changes in the applied magnetic field in the MR fluid. The two first natural frequencies had been compared with experimental tests made in another work.*

***Keywords:** modeling, vibration atenuation, Magneto-Rheological Fluid, ANSYS, finits elements*