



## PROJETO DE CONTROLE HIBRIDO APLICADO A VIBRAÇÕES EXCESSIVAS EM UMA ESTRUTURA

DIOGO BATISTA FERNANDES, FÁBIO ROBERTO CHAVARETTE

UNESP – Univ. Estadual Paulista  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica  
Departamento de Matemática  
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS)  
Rua Rio de Janeiro, 266 - CEP: 15385-000 Ilha Solteira, SP, Brasil

*(Recibido 14 de mayo de 2016, para publicación 27 de julio de 2016)*

**Resumo** – Amortecedores de massa sintonizados (AMS) ou Absorvedores Dinâmicos são dispositivos para controle passivo de vibrações em máquinas, prédios ou outras estruturas. Com o passar dos anos esses dispositivos foram aprimorados e tornaram-se mais versáteis. Neste trabalho, será abordado um dispositivo considerando uma dependência cúbica do deslocamento na rigidez do elemento elástico acoplado à massa principal e conectada ao aparelho, ambos em paralelo com um amortecimento viscoso linear. O problema é modelado através de equações diferenciais ordinárias não lineares que serão linearizadas em torno de seu ponto de equilíbrio. Como forma de excitar o AMS, foi utilizada uma excitação sísmica sendo esta uma função espectral real, o espectro Tajimi-Kanai, já que em uma situação real, as propriedades do solo local produzem alteração nas propriedades dinâmicas, causando assim uma instabilidade na estrutura onde foram utilizados parâmetros para encontrar um comportamento caótico no sistema. Como forma de minimizar as vibrações causadas pela excitação sísmica foi proposta um controle híbrido estrutural. O controle estrutural, basicamente promove alterações nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura, seja pela adição de dispositivos externos, seja pela ação de forças externas. A técnica de controle que será acoplada ao AMS é o controle semiativo, o amortecedor magneto reológico, com o objetivo de minimizar as vibrações e reduzir o movimento caótico do sistema a um ponto estável. A estratégia de controle híbrido adotado demonstra uma eficiência para este tipo de problema e pode ser utilizada como forma de se prevenir perdas materiais, danos ou ruínas de construções.

**Palavras-chave** – Vibrações Excessivas, caos, controle, amortecedor de massa sintonizado.

### 1. INTRODUÇÃO

Os terremotos são movimentos repentinos do terreno, frequentemente ocasionados por processos naturais, devido à passagem de ondas sísmicas. Estão entre as principais fontes originárias de abalos sísmicos: os deslizamentos de placas tectônicas, onde ocorre liberação de tensões acumuladas no interior da crosta terrestre; atividade vulcânica ou magmática; impacto de meteoritos; ruptura de bloco de rochas através de uma falha geológica; explosões artificiais, escorregamento de taludes ou encostas [1].

Os desastres ambientais ocasionados pelos abalos sísmicos afetam populações do mundo todo. Eles exemplificam grande quantidade de energia e às vezes ocasionam grandes tragédias, como aconteceu na cidade do México na década de 1980, em que um enorme terremoto teve seu epicentro no litoral mexicano e por volta de cinquenta segundos mais tarde atingiu a cidade do México devastando diversos edifícios. Este evento ocasionou prejuízos severos, não apenas material mas vitimou cerca de nove mil e quinhentas pessoas, e estimou trinta mil pessoas feridas, e cem mil desabrigados, de acordo com especialistas. Onde quatrocentos e vinte edifícios colapsaram e três mil cento e vinte e quatro ficaram seriamente danificados. Este abalo sísmico acarretou um grande impacto na economia e na vida cotidiana do México, mesmo dispondo de uma das melhores normas internacionais para a construção de edifícios [2].

Como os terremotos são fenômenos naturais frequentes é necessário compreender seu comportamento. Os sismógrafos são instrumentos sensíveis que identificam e compilam os movimentos das partículas da superfície em uma definida região, portanto, mesmo sendo um sistema com características aleatórias, é

possível medi-los, mas não impedi-los. Dessa forma é crucial desenvolver tecnologias que possam diminuir seus efeitos de atuação.

A atividade sísmica pode causar oscilações excessivas em um edifício, que podem conduzir a uma falha estrutural. Para manter a integridade de um edifício sob ação de sismos, um adequado projeto de construção é realizado, envolvendo vários sistemas de controle de vibração sísmica. Uma alternativa para minimizar vibrações instáveis é o controle estrutural. O controle estrutural, basicamente promove alterações nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura, seja pela adição de dispositivos externos, seja pela ação de forças externas. Uma das formas de eliminar as vibrações excessivas em uma estrutura é implementar o uso de amortecedores de massas sintonizados (AMS), ou também denominados, absorvedores dinâmicos.

Pesquisas recentes, analíticas e experimentais, vêm se intensificando, no controle de vibrações em estruturas [3,4]. E o uso de AMSs está ganhando mais aceitação, não só na concepção de novas estruturas e componentes, mas também na reforma das estruturas existentes, para melhorar a sua confiabilidade contra ventos, terremotos e atividades humanas [5]. De 1971 até a atualidade, inúmeros AMSs foram instalados em arranha céus e torres com grande êxito, onde a maioria foi eficaz na redução de respostas dinâmicas na estrutura.

Devido ao range de frequência limitado do AMS, que fica restrito a uma pequena faixa próxima a alguma frequência natural do sistema, se faz necessário um sistema mais eficaz, que consiga mitigar vibrações sob excitação de altas frequências e elevada magnitude. Para isso, neste trabalho será considerado um sistema de controle híbrido, onde se busca associar os benefícios de dois sistemas distintos, um sistema passivo, o AMS, e outro sistema semiativo, o amortecedor magneto reológico (AMR).

## 2. MODELO

O modelo do sistema mecânico adotado neste trabalho foi proposto por Frahm [6] e citado por Viguié [7], sendo apresentado o conceito básico de um AMS, considerando um acoplamento linear composto de uma massa mola, acoplado a um oscilador não linear conservativo. O sistema não linear é ilustrado na Fig. 1, onde possui acoplamento de um oscilador não linear, portanto um sistema com dois graus de liberdade.

$m_1$ ,  $k_{nl1}$  e  $c_1$  são a massa, rigidez e amortecimento do sistema principal, respectivamente;  $m_2$ ,  $k_{nl2}$  e  $c_2$  são a massa, rigidez e amortecimento do amortecedor de massa sintonizado (AMS), respectivamente;  $x_1(t)$  o deslocamento do sistema principal em relação à base;  $x_2(t)$  o deslocamento da massa  $m$  do AMS em relação à base e  $S(t)$ : força de excitação dinâmica.

As energias cinéticas ( $T$ ) totais do sistema são:

$$T = \frac{1}{2} [m_1 \dot{q}_1^2 + m_2 \dot{q}_2^2] \quad (1)$$

As energias potenciais ( $U$ ) totais do sistema são:

$$U = \frac{1}{2} [k_{nl1} q_1^2 + k_{nl2} (q_2 - q_1)^2] \quad (2)$$

As energias dissipativas ( $E_d$ ) totais do sistema são:

$$E_d = \frac{1}{2} [c_1 \dot{q}_1^2 + c_2 (\dot{q}_2 - \dot{q}_1)^2] \quad (3)$$

Logo a equação de Lagrange para coordenada generalizada  $q_1$  é:

$$m_1 \ddot{q}_1 + c_1 \dot{q}_1 + c_2 (\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + k_{nl1} (q_1^3) + k_{nl2} (q_1 - q_2)^3 = 0 \quad (4)$$

Logo a equação de Lagrange para coordenada generalizada  $q_2$  é:

$$m_2 \ddot{q}_2 + c_2 (\dot{q}_2 - \dot{q}_1) + k_{nl2} (q_2 - q_1)^3 = 0 \quad (5)$$

Aplicando os conceitos teóricos de Euler-Lagrange, em termos de energias do sistema, chegamos as equações (4) e (5), que correspondem ao sistema ilustrado na Fig. 1.

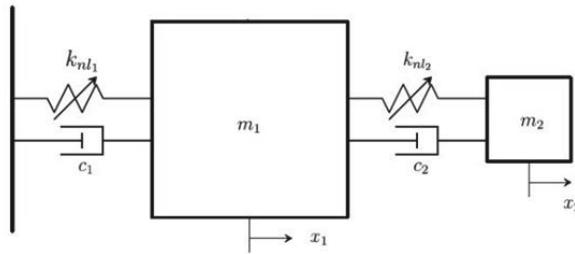


Fig. 1. Amortecedor de massa sintonizado acoplado a um oscilador não linear ([7]).

Fazendo  $\dot{x}_1 = x_3$ ,  $\dot{x}_2 = x_4$ ,  $\dot{x}_3 = \ddot{x}_1$  e  $\dot{x}_4 = \ddot{x}_2$ , temos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_3 = -\frac{c_1}{m_1}x_3 - \frac{c_2}{m_1}(x_3 - x_4) - \frac{k_{nl1}}{m_1}x_1^3 - \frac{k_{nl2}}{m_1}(x_1 - x_2)^3 \\ \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_4 = -\frac{c_2}{m_2}(x_4 - x_3) - \frac{k_{nl2}}{m_2}(x_2 - x_1)^3 \\ \dot{x}_2 = x_4 \end{array} \right. \quad (6)$$

### 3. SIMULAÇÃO NUMERICA

Para realizar as simulações numéricas da equação (6) foi implementado um programa no código Matlab®6.5, utilizando-se o integrador ODE45, considerando-se os valores numéricos para os parâmetros e condições iniciais,  $x_1 = 1$ ,  $x_2 = 0$ ,  $x_3 = 1$  e  $x_4 = 0$ ; rigidez,  $k_{nl1} = 0.1$  e  $k_{nl2} = 0.0025$ ; massas,  $m_1 = 1$  e  $m_2 = 0.05$ ; amortecimento,  $c_1 = 0.02$  e  $c_2 = 0.02$ .

A Fig. 2 ilustra o comportamento estável do sistema dinâmico com as projeções dos planos de fases, históricos no tempo e espectros de frequência para o modelo abordado.

A Figura 2a apresenta o deslocamento em função do tempo, mostrando que após uma perturbação inicial, o sistema que tem comportamento estável para as condições aplicadas, retornando a posição de origem, ou ponto de equilíbrio estável.

A Figura 2b apresenta a velocidade em função do tempo, que novamente demonstra o retorna a posição de equilíbrio.

A Figura 2c apresenta o deslocamento do sistema principal em função da frequência, que no caso, teve apenas uma perturbação inicial, não periódica, e que não apresenta excitações posteriores.

A Figura 2d apresenta a velocidade do AMS em função da frequência, que mesmo sofrendo apenas perturbação inicial em seu deslocamento, converte a energia potencial adquirida em energia cinética, fazendo com que o sistema adquira velocidades e acelerações, posteriores a este deslocamento inicial. Logo se observa que o sistema não apresenta velocidades em outras frequências, demonstrando não haver outras excitações.

A Figura 2e apresenta o plano de fase, que é a relação entre as coordenadas generalizadas, velocidade e deslocamento, comprovando o sistema retornando a um único ponto.

#### 3.1. Incluindo a Excitação Sísmica

Nesta seção, pretende-se demonstrar a eficiência de um amortecedor de massa sintonizado aplicado a uma estrutura sob influência de oscilações sísmicas. Estas oscilações serão inseridas na estrutura teórica através da utilização do modelo de Tajimi-Kanai. O modelo Tajimi-Kanai descreve e simula registros temporais do movimento do solo, onde frequências e amplitudes não estacionárias generalizadas (aleatórias) são incorporadas no modelo. A técnica de janela deslizante com o tempo é utilizada para avaliar a variação dos parâmetros do modelo com o tempo, usando registros sísmicos reais. O modelo usa como

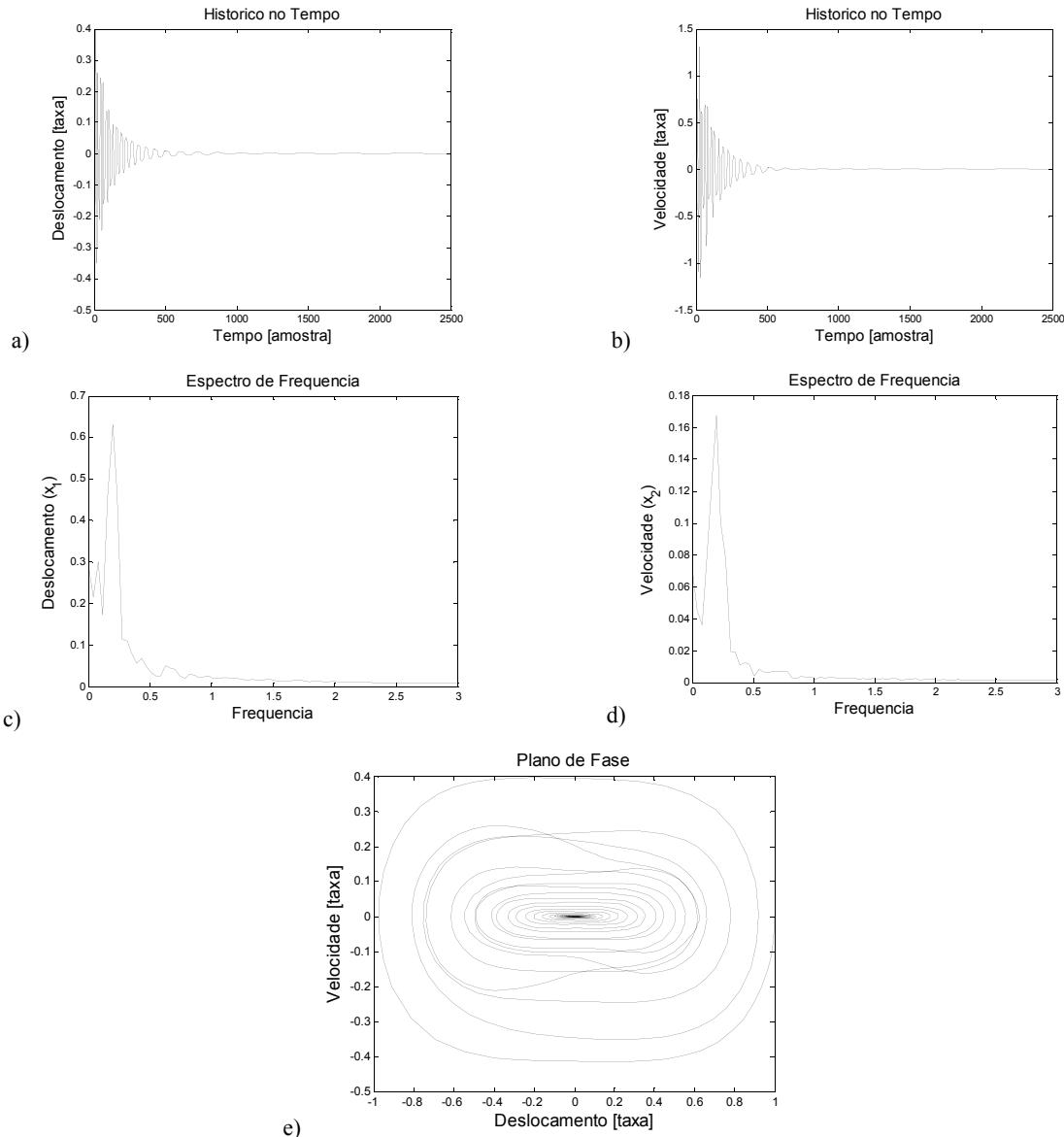


Fig. 2. Comportamento da Estrutura. a) Deslocamento versus tempo, b) Velocidade versus tempo, c) Deslocamento versus frequência. d) Velocidade versus frequência e e) Plano de Fase.

base os sismos ocorridos no Irã: Naghan (1977), Tabas (1978) e Manjil (1990). O modelo e seu algoritmo são capazes de captar com precisão as características não estacionárias da aceleração destes terremotos (acelerogramas), onde as características estatísticas das curvas de resposta espectral demonstram grande eficácia do modelo ao se comparar como os registros reais [8].

Para melhorar a confiança, em uma abordagem determinística, vários registros de terremotos disponíveis são empregados, a fim de incluir o conteúdo de várias frequências, bem como os efeitos de outros parâmetros. O modelo proposto por Tajimi e Kanai [9], portanto denominado Tajimi-Kanai, tem sido aplicado usualmente em situações problema, em que se pretende através de simulação numérica, observar o comportamento de estruturas sob influência de excitações sísmicas. A excitação sísmica gerada pelo equacionamento a seguir demonstrado é considerada uma excitação do tipo ruído branco, uma vez que abrange uma ampla gama de frequências, portanto ruído ideal. Em sua forma original é idealizada como um processo aleatório estacionário, ou seja, suas características estatísticas não mudam com o tempo, logo se considerarmos dois instantes distintos  $t_1$  e  $t_2$ , as características não dependerão destes instantes especificamente, apenas da diferença entre eles.

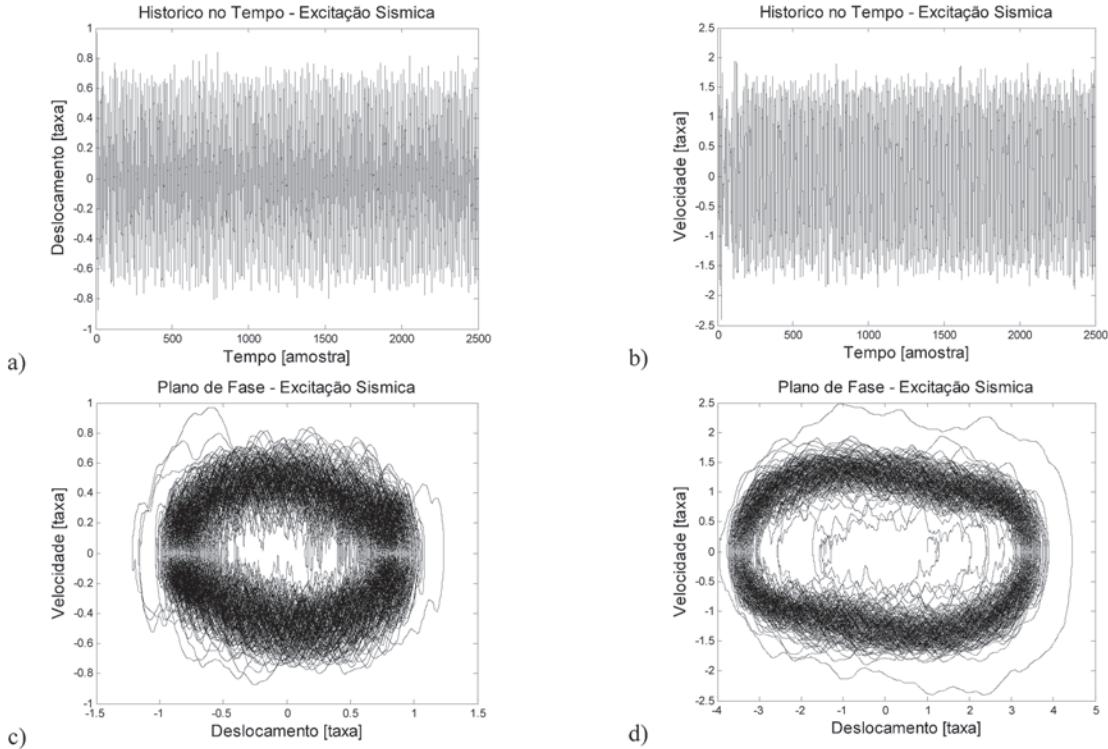


Fig. 3. Comportamento da Estrutura com Excitação Sísmica. a) Deslocamento versus tempo, b) Velocidade versus tempo, c) Plano de Fase da Estrutura e d) Plano de Fase do AMD.

Sendo o modelo Tajimi-Kanai,

$$S_g(f) = \frac{1+\xi_g^2(f/f_g)^2}{[1-(f/f_g)^2]^2 + (2\xi_g f/f_g)^2} S_0 \quad (7)$$

onde os parâmetros são descritos como se segue:  $S_g(f)$  representa a densidade espectral de aceleração em função da frequência  $f$  (que é  $F(t) \neq 0$ );  $f_g$  é a frequência característica dos mantos de solo local;  $\xi_g$  é a razão do amortecimento dos mantos do solo local; e  $S_0$  é a intensidade do ruído branco [9].

Esses parâmetros levam em consideração características geológicas específicas regionais, portanto podem ser ajustados convenientemente de acordo com a magnitude, frequências de ressonância do solo, e atenuação das ondas sísmicas no solo. Logo podem ser empregados utilizando as características específicas do local no qual se deseja avaliar as propriedades dinâmicas da excitação.

Aplicando-se a excitação sísmica do tipo Tajimi-Kanai, (7), na Estrutura, (6), a Fig. 3 ilustra o comportamento do modelo proposto com a excitação sísmica.

Nota-se que o sistema não apresenta mais um comportamento estável devido à aplicação da excitação do tipo Tajimi-Kanai, por isso faz-se necessário o cálculo do expoente de Lyapunov através do método de Wolf para a verificação do comportamento caótico [10].

A Fig. 4 mostra a evolução do comportamento dos expoentes de Lyapunov sendo:  $\lambda_1=0.032$ ,  $\lambda_2=0.002$ ,  $\lambda_3=-0.038$  e  $\lambda_4=-0.04$ . O valor de  $\lambda_1$  é positivo, que segundo Savi [11] isto implica que a trajetória diverge exponencialmente da órbita original, indicando um sistema não estável, do tipo caótico, caracterizando assim o desabamento ou destruição da estrutura podendo levar a um grande número de vítimas e prejuízos econômicos.

Com o objetivo de minimizar as vibrações e reduzir o movimento oscilatório causado no sistema, na seção a seguir propõe-se a aplicação de um controle híbrido para reduzir este movimento caótico para um ponto estável.

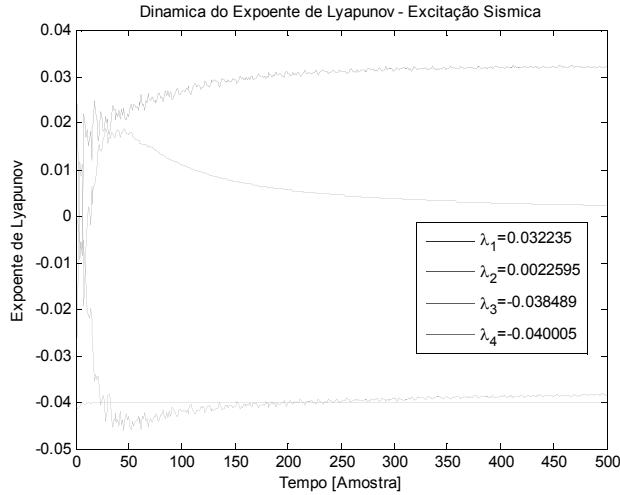


Fig. 4. Dinâmica dos Expoentes de Lyapunov para a Excitação Sismica.

#### 4. PROJETO DE CONTROLE HIBRIDO

Uma alternativa para minimizar vibrações instáveis é o controle estrutural. O controle estrutural, basicamente promove alterações nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura, seja pela adição de dispositivos externos, seja pela ação de forças externas. Uma alternativa para minimizar as vibrações instáveis em uma estrutura é a utilização do controle semi-ativo sendo proposto o amortecedor magneto reológico (AMR).

Para desenvolver algoritmos de controle que utilizem amortecedores MR, um número significativo de modelos matemáticos tem surgido com o objetivo de descrever o comportamento não linear intrínseco destes dispositivos [12]. O modelo matemático utilizado no trabalho é o modelo de Bouc-Wen Modificado, este modelo é mais adequado para descrever o comportamento de dispositivos que apresentam uma rápida queda da força (*roll-off*) quando a velocidade do pistão passa por zero.

##### 4.1. Modelo de Bouc-Wen Modificado

De acordo com Dyke [13], o modelo de Bouc-Wen é numericamente tratável e usado extensivamente para modelar sistemas que contém histerese, o modelo de Bouc-Wen é extremamente versátil e pode exibir uma grande variedade de comportamento da histerese. Com a intenção de obter modelos ainda mais próximos dos resultados experimentais, Spencer *et al.* [12] propôs uma modificação no modelo de Bouc-Wen, essa proposta baseia-se na introdução de um amortecedor viscoso e uma mola linear no modelo original de Bouc-Wen, assim, esse modelo modificado é mais adequado para descrever o comportamento de dispositivos que apresentam uma rápida queda da força (*roll-off*) quando a velocidade do pistão passa por zero. A Fig. 5 ilustra o modelo de Bouc-Wen modificado proposto por Spencer *et al.* [12].

A força  $F$  do sistema é determinada pela relação a seguir:

$$F = c_{MR}\dot{y} + k_{MR}(x - x_0) \quad (8)$$

sendo,

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_{MR}} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (9)$$

e

$$\dot{z} = -\rho |\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \gamma(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + \beta(\dot{x} - \dot{y}) \quad (10)$$

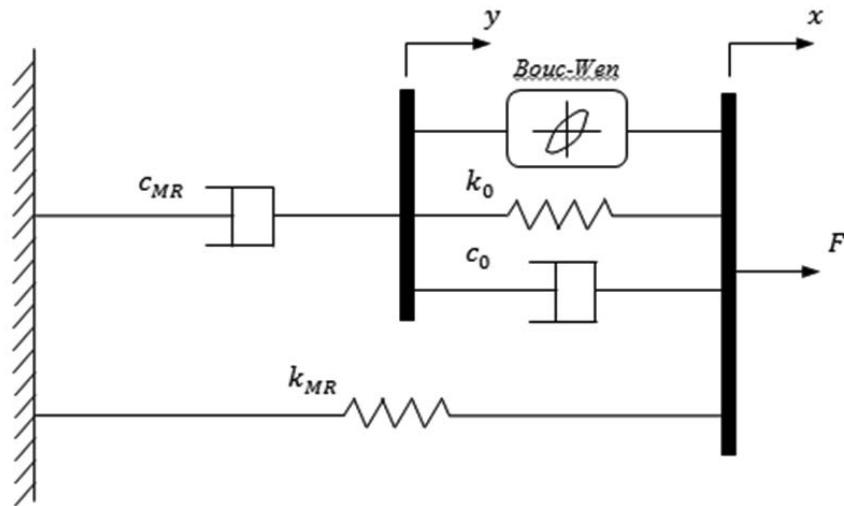


Fig. 5. Modelo Bouc-Wen modificado [12].

Nas equações acima,  $c_0$  e  $k_0$  são, respectivamente, o coeficiente de amortecimento viscoso e de rigidez elástica,  $x_0$  é o deslocamento inicial,  $x$  é a variável dependente,  $\alpha$  é um coeficiente de rigidez e as constantes  $\rho$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  e  $n$  dependem das características do amortecedor.

A tensão de cisalhamento do fluido MR depende diretamente do campo magnético aplicado. Assume-se que  $\alpha$  e  $c_0$  e  $c_{MR}$  das equações (8) e (9), são funções que dependem de uma tensão elétrica ( $v$ ) aplicada na bobina do amortecedor, na forma:

$$\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (11)$$

$$c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (12)$$

$$c_{MR}(u) = c_{MRa} + c_{MRb} u \quad (13)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (14)$$

A voltagem de alimentação ( $v$ ) para esse amortecedor MR pode variar de 0 a 2 voltas, e os parâmetros para o modelo Bouc-Wen modificado estão apresentados na tabela 1 [14].

Tabela 1. Parâmetros do modelo Bouc-Wen modificado.

Parâmetros	Valores
$c_{0a}$	784 N s/m
$c_{0b}$	1803 N s/V m
$k_0$	3610 N/m
$c_{MRa}$	14649 N s/m
$c_{MRb}$	34622 N s/V m
$k_{MR}$	840 N/m
$x_0$	0.0245 m
$\alpha_a$	12441 N/m
$\alpha_b$	38430 N/V m
$\rho$	$136320 \text{ m}^{-2}$
$\gamma$	$2059020 \text{ m}^{-2}$
$\beta$	58
$n$	2
$\eta$	$190 \text{ s}^{-1}$

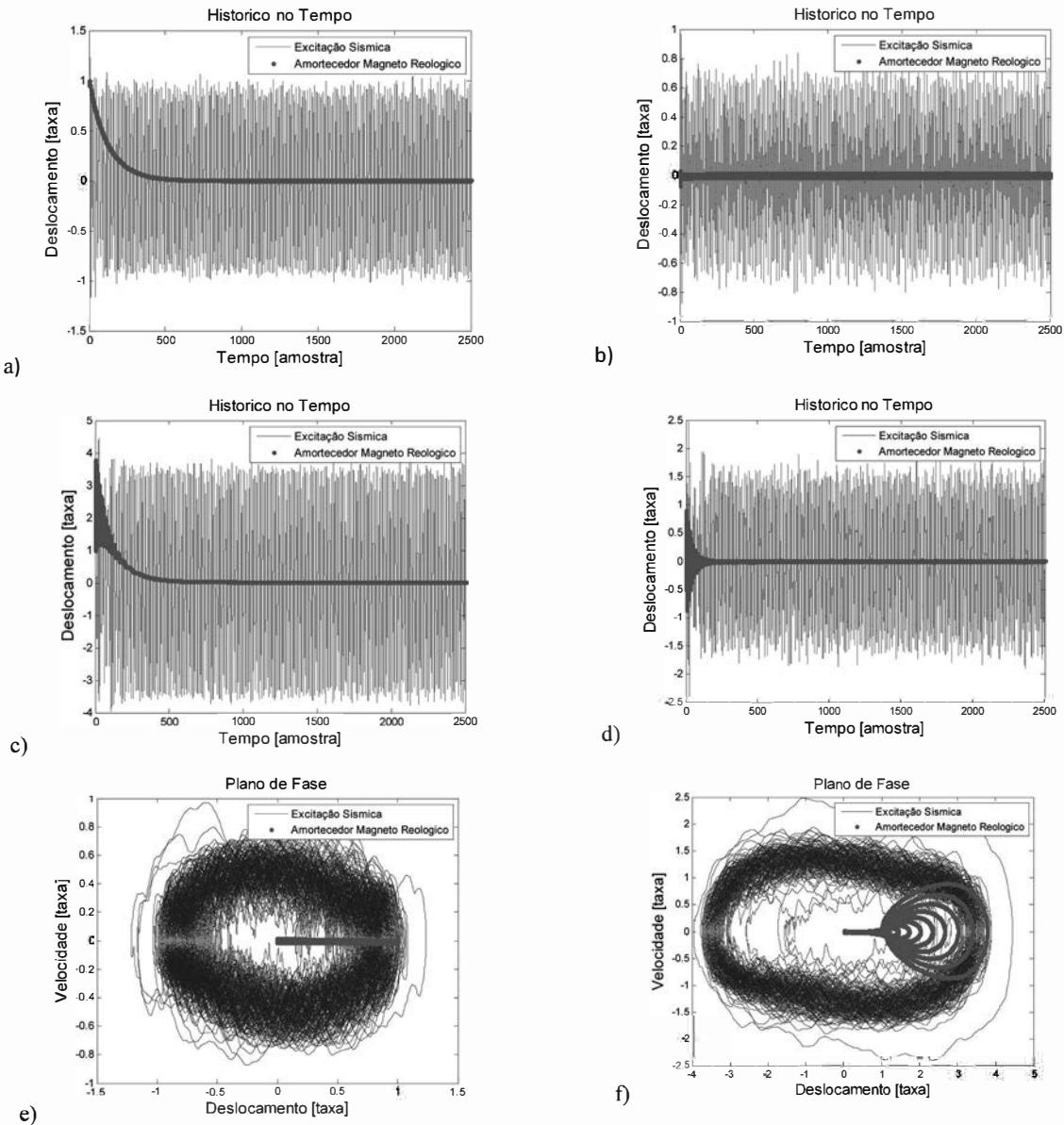


Fig. 6. Comportamento da Estrutura com Amortecedor Magneto Reológico. a) Deslocamento versus tempo da Estrutura, b) Velocidade versus tempo da Estrutura, c) Deslocamento versus tempo do AMD, d) Velocidade versus tempo do AMD, e) Plano de Fase da Estrutura e f) Plano de Fase do AMD.

#### 4.2. Aplicando o Amortecedor Magneto Reológico ao Modelo Proposto

Aplicando o amortecedor magneto reológico no modelo da equação (6), a equação do sistema controlado pode ser escrita da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_3 = -\frac{c_1}{m_1}x_3 - \frac{c_2}{m_1}(x_3 - x_4) - \frac{k_{nl1}}{m_1}x_1^3 - \frac{k_{nl2}}{m_1}(x_1 - x_2)^3 - S - F \\ \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_4 = -\frac{c_2}{m_2}(x_4 - x_3) - \frac{k_{nl2}}{m_2}(x_2 - x_1)^3 - S - F \\ \dot{x}_2 = x_4 \end{array} \right. \quad (15)$$

A Fig. 6 ilustra o comportamento sistema quando o amortecedor magneto reológico é aplicado no modelo e está sem controle.

## 5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os Desastres Naturais constituem um grande interesse da engenharia, as consequentes catástrofes naturais têm exigido nos últimos tempos dos governantes e sociedades de vários países, políticas de prevenção e ação de socorro às vítimas de regiões atingidas por terremotos, ciclones, e desequilíbrios climáticos, demonstrando ser um tema cada vez mais presente no cotidiano das pessoas.

O Desastre Natural foco deste trabalho foi à ocorrência de ações sísmicas em estruturas, onde foi proposto o modelo matemático de um amortecedor de massa sintonizado sofrendo uma excitação externa tipo Tajimi-Kanai, que são vibrações excessivas causadas por carregamentos dinâmicos, como o terremoto. Essa excitação considera as propriedades do solo local, uma situação real, que produzem alteração nas propriedades dinâmicas da estrutura, que neste caso, levaram a estrutura a um comportamento caótico.

Este comportamento caótico ilustrado, muitas vezes causam desastres naturais que venham causar perdas biológicas, materiais, danos ou ruína de construções humanas podendo levar a um grande número de vítimas e prejuízos econômicos.

O controle estrutural, basicamente promove alterações nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura, seja pela adição de dispositivos externos, seja pela ação de forças externas. Podem-se adotar vários modelos de controle, como o controle passivo, controle ativo, controle híbrido, e o controle semi-ativo. Foi proposta a aplicação da estratégia do amortecedor magneto reológico no modelo, sendo que esta estratégia híbrida minimizou as vibrações e reduzir o movimento oscilatório caótico do sistema a um ponto estável. A Fig. 6 mostra o comportamento caótico (em azul) e a eficácia da estratégia de controle (em vermelho) para este problema, podendo assim auxiliar na prevenção deste tipo de Desastre Natural.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Sistemas Complexos (SISPLEXOS) onde o projeto foi desenvolvido e ao auxílio financeiro concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, através do Proc. FAPESP No. 2014/16807-3.

## REFERÊNCIAS

- [1] Meyer, H., Terremotos. In: Taller Regional de Capacitacion para Desastres Naturais. Bogotá: Terremotos (1991)
- [2] Ugalde, A., *Terremotos: cuando la tierra tiembla*. 1. ed. Madrid: Editorial CSIC-CSIC Press (2009)
- [3] Mesquita, C.D., Lässig, J.L., “Introducción a los fluidos magnetoreológicos con aplicaciones en Ingeniería”, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, **16**(1), 27-36 (2012)
- [4] Bossisa, G., Khuzira, P., Lacisb, S., Volkovab, O., “Yield behavior of magnetorheological suspensions”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 258–259, 456–458 (2003)
- [5] Wang, J.-F., Lin, C.-C., “Seismic performance of multiple tuned mass dampers for soil–irregular building interaction systems”, *International journal of solids and structures*, **42**(20), 5536-5554 (2005)
- [6] Frahm, H., A device for damping vibrations of bodies, US Patent 989958 (1909)
- [7] Viguié, R., Kerschen, G., “Nonlinear vibration absorber coupled to a nonlinear primary system: a tuning methodology”, *Journal of Sound and Vibration*, **326**(3), 780-793 (2009)
- [8] Rofooei, F.R., Mobarake, A., Ahmadi, G., “Generation of artificial earthquake records with a nonstationary Kanai–Tajimi model”, *Engineering Structures*, **23**(7), 827-837 (2001)
- [9] Kanai, K., “Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground”, *Bulletin of Earthquake Research Institute*, Uni. Tokyo, 35, 309-325 (1957)
- [10] Wolf, A., Swift, J.B., Swinney, H.L., Vastano, J.A., “Determining lyapunov exponents from a time series”, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **16**(3), 285–317 (1985)
- [11] Savi, M., *Dinâmica Não-linear e Caos*. E-PAPERS, ISBN 9788576500629. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=AlKIjK9zz0oC> (2006)

- [12] Spencer Jr.B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K., Carlson, J.D., "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart materials and structures*, **5**(5), 565 (1996)
- [13] Dyke, S.J., Acceleration feedback control strategies for active and semi-active control systems: modeling, algorithm development, and experimental verification. Tese (Doutorado) - Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana, USA. (1996)
- [14] Lai, C.Y., Liao, W.H., "Vibration control of a suspension system via a magnetorheological fluid damper", *Journal of Vibration and Control*, Thousand Oaks, **8**(4), 527-547 (2000)

## HYBRID CONTROL PROJECT APPLIED TO EXCESSIVE VIBRATIONS IN A STRUCTURE

**Abstract** – Tuned Mass Dampers tuned (TMD) or Dynamic Absorbers are devices for passive control of vibration in machinery, buildings or other structures. Over the years these devices have improved and become more versatile. In this work, we consider a device with a cubic dependence on displacement in the rigidity of the elastic member coupled to the main mass and connected to the apparatus, both in parallel with a linear viscous damping. The problem is modelled using nonlinear ordinary differential equations to be linearized around its equilibrium point. As a way to excite the TMD, a seismic excitation was used and this is a real spectral function, Tajimi-Kanai spectrum, as in a real situation, the local soil properties produce change in the dynamic properties, thus causing instability in the structure where parameters were used to find a chaotic behaviour in the system. In order to minimize the vibrations caused by seismic excitation was proposed a structural hybrid control. The structural control, basically promotes changes in stiffness and damping of the structure, or by adding external devices, either by the action of external forces. The control technique that is coupled to the TMD is the semi-active control, the magneto rheological damper absorber, in order to minimize vibrations and reduce the chaotic motion of the system to a stable point. The hybrid control strategy adopted demonstrates efficiency for this type of problem and can be used as a way to prevent property loss, damage or buildings ruins.

**Keywords** – Vibrations excessive Chaos Control, Tuned Mass Damper.