

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

DIOGO BATISTA FERNANDES

CONTROLE HÍBRIDO PARA MINIMIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Ilha Solteira
2016

DIOGO BATISTA FERNANDES

CONTROLE HÍBRIDO PARA MINIMIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira- UNESP, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Mecânica dos sólidos.

Prof. Dr. Fábio Roberto Chavarette
Orientador

Ilha Solteira

2016

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F363c Fernandes, Diogo Batista .
 Controle híbrido para minimização de vibrações / Diogo Batista Fernandes.
Ilha Solteira: [s.n.], 2016
 66 f. : il.

 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2016

 Orientador: Fábio Roberto Chavarette
 Inclui bibliografia

 1. Amortecedores. 2. Sistema não Linear. 3. Simulação numérica.
4. Controle estrutural. 5. Comportamento caótico.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CONTROLE HÍBRIDO PARA MINIMIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES

AUTOR: DIOGO BATISTA FERNANDES

ORIENTADOR: FABIO ROBERTO CHAVARETTE

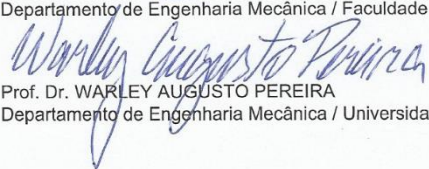
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MECÂNICA DOS SÓLIDOS pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. FABIO ROBERTO CHAVARETTE
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de Rio Verde

Ilha Solteira, 08 de julho de 2016

DEDICO,

Ao meu pai **Benedito Fernandes** e a minha mãe **Rita Antônia Batista Fernandes**, que me educaram e assim me deram condições para realizar grandes conquistas.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, pela força espiritual para a realização desse trabalho.

Aos Meus Avós Joaquim Batista Filho (in memoriam), que desde minha infância me instigou a resolver enigmas, cálculos mentais e quebra-cabeças, despertando-me o interesse pela busca do conhecimento e gosto pelas ciências e engenharia; Noêmia Lisboa Ramos (in memoriam), pelo tempo destinado aos meus cuidados; Geremias José fernandes (in memoriam) e Benedita Pires Fernandes (in memoriam) por todo ensinamento, amor e incentivo aos objetivos por mim almejados.

Aos amigos que conviveram comigo durante minha passagem por Ilha Solteira: Ana Paula Guimarães, Anderson Inácio, Carlos Eduardo Brito, Edsel Portilho, Edson Roberto da Silva, Mauro Dias, Paulo Henrique Pimenta, Rodrigo Borges e Thalles Denner.

A todos os funcionários e professores da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho em especial aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos diretores das Faculdades de Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção da Universidade de Rio Verde, Prof. Dr. Warley Augusto Pereira, Prof. Me. Giancarlo Ribeiro Vasconcelos e Prof. Me. João Pires, pela confiança no meu trabalho na Universidade de Rio Verde.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Roberto Chavarette pela oportunidade concedida, ensinamentos, confiança no meu trabalho, grande paciência e, acima de tudo, pela amizade construída durante todos esses anos.

E principalmente, aos meus pais Benedito Fernandes e Rita Antônia Batista Fernandes, minha irmã Fernanda Batista Fernandes, meu cunhado Lucas Vilanova Silva, e meus sobrinhos Davi Vilanova Fernandes e Isabela Vilanova Fernandes, e demais familiares, aos quais caberiam inúmeras citações das contribuições em meu aprendizado de vida. Obrigado pela compreensão com minha ausência durante longos períodos desta jornada.

“Educação não transforma o mundo. Educação muda as pessoas. Pessoas mudam o mundo”

Paulo Freire

RESUMO

Uma das formas de eliminar as vibrações excessivas em uma estrutura é através de um controle passivo com o uso de amortecedores de massas sintonizados (AMS), ou também denominados, absorvedores dinâmicos. Um sistema passivo típico não tem suas propriedades mecânicas modificadas, em função da excitação de entrada. O sistema passivo utiliza o movimento da estrutura para produzir um movimento relativo nos dispositivos de amortecimento, pelo qual a energia é dissipada. Neste trabalho, destaca-se que o dispositivo considerado apresenta dependência cúbica do deslocamento proporcional à sua rigidez. O problema é modelado através de equações diferenciais ordinárias não lineares que são linearizadas em torno de seu ponto de equilíbrio. Mediante simulação numérica, utilizando o software Octave, demonstra-se a eficiência de um AMS aplicado a uma estrutura sob influência de oscilações sísmicas inseridas através do modelo de Kanai-Tajimi, que simulam uma situação real, em que as propriedades de solos são introduzidas. Estas oscilações promovem alterações nas propriedades dinâmicas, causando assim uma instabilidade na estrutura, em que foram utilizados parâmetros para encontrar o comportamento caótico no sistema. Como forma de minimizar as vibrações causadas pela excitação sísmica foi proposto um controle híbrido estrutural. Basicamente o controle estrutural se dá pela adição de dispositivos e/ou forças externas que promovem alterações nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura. Com o objetivo de minimizar as vibrações e reduzir o movimento caótico do sistema a um ponto estável, foi empregada a técnica de controle semiativo com o amortecedor magneto reológico acoplado ao AMS. Comprovou-se que a estratégia de controle híbrido adotado demonstra eficiência para este tipo de situação e pode ser utilizada como forma de auxiliar na atenuação de danos provocados à estruturas, evitando prejuízos econômicos, perdas biológicas e materiais.

Palavras-chave: Amortecedores. Sistema não linear. Simulação numérica. Controle estrutural. Comportamento caótico.

ABSTRACT

One of the ways to eliminate excessive vibrations in a structure is through a passive control with the use of shock absorbers tuned mass (ATM) or also called, dynamic absorbers. A typical passive system does not have its mechanical properties modified in function of an excitation input. The passive system uses the movement of the structure to produce a relative movement in the absorbers device, where by the energy is dissipated. In this work, it is noteworthy that the considered device introduces a cubic dependence of the proportional displacement to its rigidity. The problem is modeled through out nonlinear ordinary differential equations that are linearized around their equilibrium point. By numerical simulations, using Octave software, it demonstrates the efficiency of a ATM applied to a structure under the influence of seismic oscillations inserted over Kanai-Tajimi's model, that simulates a real situation in which the properties of the soils are introduced. These oscillations promote changes in the dynamic properties, thus causing an instability in the structure where there were used parameters to find chaotic behavior in the system. In order to minimize the vibrations caused by seismic excitation it is proposed a hybrid structural control. Basically structural control takes place by addition devices and/or external forces that promote alterations in the stiffness properties and the structure absorber. For minimize vibrations and reduce the chaotic motion of the system to a stable point, it was used a technique of semiactive control, the magneto rheological absorber coupled to the ATM. It has been shown that the strategy of hybrid control adopted demonstrates efficiency for this kind of situation and can be used as a way in attenuating damage caused for the structures, avoiding economic, biological and material losses.

Keywords: Absorbers. Nonlinear System. Numerical simulations. Structural control. Chaotic behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Absorvedor de vibração sugerido por Den Hartog.	20
Figura 2 – AMS instalado em torre de antena.	21
Figura 3 – Amortecedor híbrido para casas.	23
Figura 4 – Sistema de isolamento sísmica com amortecedor de viscosidade controlada usando fluido magneto-reológico (MR).	24
Figura 5 – Amortecedor de massa sintonizado acoplado a um oscilador não-linear.	26
Figura 6 – Amortecedor de massa sintonizado acoplado a um oscilador não-linear.	27
Figura 7 – Diagrama de corpo livre do sistema principal.	27
Figura 8 – Diagrama de corpo livre do AMS.	29
Figura 9 – Estabilidade da estrutura principal.	35
Figura 10 – Estabilidade do AMS.	36
Figura 11 – Resposta da estrutura sem excitação – deslocamento versus tempo.	37
Figura 12 – Resposta da estrutura sem excitação – velocidade versus tempo.	37
Figura 13 – Resposta da estrutura sem excitação – plano de fase.	38
Figura 14 – Estrutura principal sob ação de excitação periódica.	39
Figura 15 – Resposta da estrutura principal sob excitação periódica.	40
Figura 16 – Estrutura sob excitação periódica – velocidade em função do tempo.	40
Figura 17 – Velocidade da estrutura em função do tempo – versão ampliada.	41
Figura 18 – Plano de fase – estrutura sob excitação periódica.	41
Figura 19 – Plano de fase – versão ampliada	42
Figura 20 – Expoentes de Lyapunov – estabilidade estrutural.	42
Figura 21 – Excitação do Tipo Tajimi-Kanai.	44
Figura 22 – Excitação sísmica – deslocamento versus tempo.	45
Figura 23 – Excitação sísmica – deslocamento versus tempo - ampliado.	45
Figura 24 – Excitação sísmica – velocidade versus tempo.	46
Figura 25 – Excitação sísmica – plano de fase da estrutura.	46
Figura 26 – Excitação sísmica – dinâmica do expoente de Lyapunov.	47
Figura 27 – Estrutura sob excitação sísmica versus sem excitação.	48
Figura 28 – Estrutura sob excitação sísmica versus sem excitação – plano de fase.	48
Figura 29 – Comportamento fluido magneto reológico.	50
Figura 30 – Esquemático amortecedor magneto reológico.	51
Figura 31 – Modelo Bouc-Wen.	51

Figura 32 – Modelo Bouc-Wen modificado.....	52
Figura 33 – Sistema sob excitação sísmica e com controle híbrido.	55
Figura 34 – Estrutura principal sob excitação sísmica e com controle híbrido.....	56
Figura 35 – AMS com o AMR acoplado.	57
Figura 36 – Estrutura principal sob excitação sísmica e com controle híbrido.....	57
Figura 37 – AMS acoplado ao AMR.....	58
Figura 38 – Estrutura principal sob excitação sísmica e com controle híbrido.....	58
Figura 39 – AMS acoplado ao AMR.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do sistema.....	30
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Parâmetro constante do AMR
c_0	Coeficiente de amortecimento viscoso [Ns/m]
c_1	Coeficiente de Amortecimento viscoso do sistema principal [Ns/m]
c_2	Coeficiente de Amortecimento viscoso do amortecedor de massa sintonizado [Ns/m]
c_{MR}	Fator de amortecimento do amortecedor magneto reológico [Ns/m]
E_d	Energia dissipativas [J]
F	Força do sistema de controle [N]
k_0	Coeficiente de rigidez elástica [N/m]
k_{ln1}	Coeficiente de Rigidez não linear do sistema principal [N/m]
k_{ln2}	Coeficiente de Rigidez não linear do amortecedor de massa sintonizado [N/m]
k_{MR}	Rigidez associada ao amortecedor magneto reológico [N/m]
f_g	Frequência Característica dos mantos do solo local [Hz]
m_1	Massa do sistema principal [kg]
m_2	Massa do amortecedor de massa sintonizado [kg]
n	Parâmetro constante do AMR
q_1, q_2	Coordenadas Generalizadas
S	Excitação Externa [m]
$\dot{S}$	Velocidade da ação do sismo [m/s]
$\ddot{S}$	Aceleração da Ação do Sismo [$\frac{m}{s^2}$]
$\ddot{S}_g$	Densidade Espectral de Aceleração [$\frac{m}{s^2}$]
S_0	Intensidade do Ruído branco [m]
T	Energia cinética [J]
U	Energia potencial [J]
x_0	Deslocamento inicial [m]
$\dot{x}_1, \dot{x}_2$	Velocidades da estrutura principal e AMS respectivamente [m/s]
$\ddot{x}_1, \ddot{x}_2$	Acelerações da estrutura principal e AMS respectivamente [$\frac{m}{s^2}$]
$\dot{y}$	Velocidade do embolo do pistão do amortecedor magneto reológico [m/s]

Símbolos Gregos

α	Coeficiente de rigidez
β	Parâmetros do AMR
γ	Parâmetros do AMR
ξ_g	Razão de amortecimento dos mantos do solo local

LISTA DE ABREVIATURAS

AMS – Amortecedor de massa sintonizado

AMR – Amortecedor magneto-reológico

ONL – Oscilador não linear

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVO	16
1.2	CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	DESASTRES NATURAIS.....	18
2.2	AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADO E AMORTECEDORES MAGNETO REOLÓGICOS	20
3	MODELO PROPOSTO	26
3.1	REDUÇÃO DE ORDEM DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS	30
3.2	PONTOS DE EQUILÍBRIO.....	31
3.3	LINEARIZAÇÃO.....	32
3.4	ESTABILIDADE DO SISTEMA.....	34
3.5	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COM EXCITAÇÃO PERIÓDICA.....	38
3.6	EXCITAÇÃO SÍSMICA	43
3.6.1	O modelo de Tajimi-Kanai	43
3.6.2	Simulações numéricas com excitação sísmica	44
4	MODELO E COMPORTAMENTO DO AMORTECEDOR MR.....	50
4.1	MODELO DE BOUC-WEN PARA AMORTECEDOR MR.....	51
4.1.1	Modelo de Bouc-Wen modificado para amortecedor MR.....	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
6	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS.....	62

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 destes 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 e escorregamento de taludes ou encostas (MEYER, 1991).

Os desastres ambientais ocasionados pelos abalos sísmicos afetam populações do mundo todo. Eles expõem 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 materiais, mais vitimizou cerca de nove mil e quinhentas pessoas com a morte, deixando trinta mil pessoas feridas e cem mil desabrigados, de acordo com especialistas. Na ocasião, 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 (UGALDE, 2009).

Como os terremotos são fenômenos naturais frequentes é necessário compreender seu comportamento. Neste sentido, sismógrafos são instrumentos sensíveis que identificam e compilam os movimentos das partículas da superfície em uma definida região, portanto, mesmo sendo em geral eventos 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, conseqüentemente, 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. Tal controle 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, teóricas e experimentais, vêm se intensificando nesta área de controle de vibrações em estruturas. Em particular, o uso de AMSs tem ganhado maior 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 outras ações humanas (LIN et al., 2001). De 1971 até a atualidade, inúmeros AMSs foram instalados em arranha céus e torres com grande êxito, onde a maioria foram eficazes na redução de respostas dinâmicas na estrutura.

Devido à faixa de frequência limitada, de atuação do AMS, próxima a alguma frequência natural do sistema, faz-se necessário um sistema mais eficaz, que consiga reduzir vibrações sob excitação que não esteja dentro desta faixa. Para isso foi considerado um sistema de controle híbrido, no qual se buscou associar os benefícios de dois sistemas distintos: o sistema passivo (AMS) e outro sistema semiativo (o amortecedor magneto reológico, AMR).

1.1 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é analisar o comportamento dinâmico de um oscilador não linear (ONL) acoplado a um amortecedor de massa sintonizado (AMS) conjuntamente com um amortecedor magneto reológico (AMR), com o intuito de minimizar ou eliminar as vibrações estruturais. Entre os objetivos secundários destacam-se:

- implementar um algoritmo computacional para simular numericamente o problema proposto, através do software livre, Octave;
- aplicar um modelo, compatível a um sistema mecânico real, de acordo com a literatura disponível;
- demonstrar a eficiência do controle híbrido, com o amortecedor de massa sintonizado e o amortecedor magneto-reológico, no controle de oscilações excessivas às quais estruturas estão submetidas;
- utilizar um sistema de controle para minimizar vibração devido ação de ondas sísmicas.

1.2 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em seis Capítulos, sucintamente apresentados a seguir:

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – Este capítulo apresenta o estudo sobre desastres naturais e terremotos.

Capítulo 3 – Modelo proposto – Neste capítulo apresentam-se características dos métodos matemáticos, que descrevem o comportamento do sistema; excitação sísmica Tajimi-Kanai, que com base em sismos reais ocorridos descreve registros temporais do movimento do solo; equações diferenciais ordinárias, que foram obtidas através da modelagem do sistema; estudo de estabilidade, que para variações de parâmetros estruturais é avaliada a integridade estrutural; matriz jacobiana, que é obtida pela derivada parcial de cada equação em função das variáveis que representam o ponto de equilíbrio; autovalores da matriz jacobiana que servem para classificação de estabilidade/instabilidade do sistema; planos de fase que relacionam velocidades e deslocamentos; e expoentes de Lyapunov, que demonstram ou não o comportamento caótico do sistema.

Capítulo 4 – Metodologia de Solução – Neste capítulo apresenta-se o modelo de controle estrutural, que envolve amortecedor magneto reológico (AMR).

Utiliza-se a técnica de controle semiativa, através da indução do AMR, com o objetivo de minimizar as vibrações e reduzir o movimento caótico do sistema a um ponto estável.

Capítulo 5 – Resultados e Discussão – Neste capítulo, os resultados são apresentados e discutidos.

Tais resultados foram obtidos para estrutura sem considerar a excitação sísmica. Também apresenta-se resultados devido à excitação sísmica, demonstrando o efeito caótico no movimento. Ainda, são discutidos resultados considerando a ação do controle híbrido, onde se nota a eficiência da minimização das vibrações excessivas da estrutura.

Capítulo 6 – Conclusões – Neste capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho.

Comprova-se que 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.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um breve estudo sobre alguns desastres naturais, em particular, os terremotos. Devido ao objetivo proposto do estudo dinâmico de estruturas sob efeitos de terremotos, discute-se sucintamente sua categorização, classificações gerais e exemplo de seus efeitos, bem como suas consequências econômicas, físicas e sociais.

2.1 DESASTRES NATURAIS

Desastres naturais são ocorrências danosas causadas por eventos naturais de ampla intensidade aplicadas sobre uma determinada região, que ocasionam enormes e severas consequências sobre um sistema social, podendo impossibilitar estes de continuarem a coexistir, com os resultados cometidos.

Os desastres naturais, em geral, podem ser categorizados, segundo Silvia (2016), em relação à natureza do evento como:

- biológicos: epidemias, devastação ocasionada por insetos, investida de animais, etc.;
- geofísicos: terremotos, vulcões, movimento de massa com ausência de água;
- climatológicos: secas, temperaturas extrema, incêndios, etc.;
- hidrológicos: inundações, deslocamento de massa com presença de água;
- meteorológicos: furacões, tufões, tornados, tempestades.

Esses eventos, segundo Silvia (2016), também podem ser classificados de acordo com à evolução, em:

- desastres súbitos ou de evolução aguda: Resvala de terra, torrente de água pluvial, ventos muitos fortes, fogo propagado em estabelecimentos industriais e em prédios com grandes quantidades de pessoas, terremotos, erupções vulcânicas e outros.
- desastres de evolução crônica, ou graduais: seca, erosão, perda de solo, agricultável, desertificação, salinização do solo e outros.
- desastres por soma de efeitos parciais: acidentes de trânsito, acidentes de trabalho, incremento da violência, tráfico de drogas e doenças.

E por fim, podem ser agrupados devido à sua intensidade:

- desastres de nível IV: são aqueles que podem não ser sobrepujados pela população, a reconstituição da conjuntura normal resulta do estímulo e da atitude sincronizada dos três níveis do Sistema Nacional de Defesa Civil e em algumas situações extremas, de auxílio internacional;
- desastres de nível III: os prejuízos ocasionados são relevantes e os estragos significativos, porém o cenário de normalidade pode ser recuperado através de ajudas de recursos estaduais e federais;
- desastres de nível II: os danos causados são relevantes, porém não são estrondosos.
- desastres de nível I: Danos não são muito grandiosos, mais facilmente superadas pelas comunidades afetadas (SILVIA, 2016).

Pode-se observar que os desastres naturais usualmente tem um impacto negativo na economia. Por exemplo, o terremoto de Kobe, que ocorreu em 17 de Janeiro de 1995, na cidade de Kobe, é um dos maiores desastres naturais na história do Japão. O número de mortos alcançou mais de 6.000 e o número de feridos foram mais 40.000 (HAYASHI, 2011). Adicionalmente, construções foram completamente destruídas. Tal devastação afetou seriamente a economia da cidade de Kobe e a área ao redor. A estimativa do prejuízo econômico foi de mais de 9 bilhões de iene, aproximadamente 2,1% do produto interno bruto (PIB) do Japão. São altamente propensos a destruir a essência humana e física, como também a infraestrutura pública. Neste caso do terremoto Kobe muitos estudos registraram perda substancial da economia. Entretanto, muitos estudos empíricos registraram uma positiva correlação entre a frequência de desastres naturais e o crescimento ao longo-prazo da economia. Skidmore e Toya (2002) investigaram o impacto a longo-prazo dos desastres naturais sobre o crescimento do período de 1960-1990. Eles encontraram que a frequência de desastres climáticas é positivamente correlacionada com a acumulação de capital humano, associado com o fator aumento de produtividade.

O efeito positivo na economia dos desastres naturais é denominado destruição original ou desastres originais. O termo reflete uma positiva correlação que pode ser interpretada como evidência para hipóteses que desastres naturais providenciam oportunidades de alterar o estoque existente de capital e adotar novas tecnologias, assim funcionando como um tipo de destruição original.

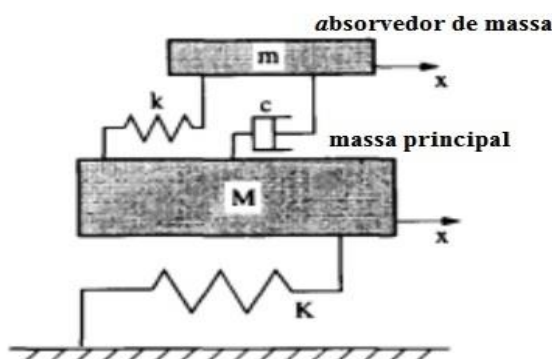
Dado o exposto acima, os desastres naturais, em particular os terremotos, categorizados como geofísico e de natureza súbita, com níveis elevados de destruição, normalmente

enquadrando nos níveis III e IV, quando sua magnitude (intensidade) for alta, abrem novas discussões e buscas por novas tecnologias, assim como esta que é proposta neste trabalho.

2.2 AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADO E AMORTECEDORES MAGNETO REOLÓGICOS

O conceito de controle de vibração usando um amortecedor de massa, remonta ao ano de 1909, quando Frahm Den Hartog inventou um dispositivo de controle de vibração chamado: absorvedor de vibração dinâmica. Embora os AMSs estejam entre os dispositivos de controle de vibração estruturais os mais antigos, há um ressurgimento de interesse em seu estudo na atualidade. Um certo número de novos edifícios altos, particularmente no Japão, estão agora equipados com várias versões de um sistema de minimização de vibrações sob vento e moderado sismos. Um AMS passivo (Figura 1) é o mecanismo fundamental presente em tais aplicações (RANA, 1998).

Figura 1 – Absorvedor de vibração sugerido por Den Hartog.



Fonte: Rana (1998).

Um AMS é um dispositivo que consiste de uma massa ligada às estruturas usando uma mola e um amortecedor viscoso. O efeito de amortecimento do AMS se deve ao fato que sua resposta atrasa a resposta estrutural principal por um ângulo de fase de 90° , de modo que a força elástica transmitida pelo AMS atua como uma força viscosa sobre a estrutura principal. Esta condição não ocorrerá a menos que a frequência AMS esteja sintonizada na frequência de oscilação da estrutura principal e a excitação contenha esta frequência. Portanto, as informações de propriedades estruturais são essenciais para um ótimo projeto de um AMS passivo. Em estudos anteriores sobre AMS, a maioria dos investigadores assumiram que a base estrutural

controlada é fixa, o que é razoável apenas para estruturas construídas em condições de solo muito particulares. Na verdade, muitos edifícios são construídos em meio “mole”, onde o efeito da interação solo-estrutura, pode ser significativo. Veletsos (1977) e Wolf (1985 e 1988), citados por Wang (2005), mencionam que uma interação solo/estrutura pode alterar significativamente as características dinâmicas de estruturas, como as frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração. Diversos pesquisadores estudaram o efeito da interação solo/estrutura sobre o desempenho do AMS para construções de plantas prediais sujeitas à excitações do vento e terremoto, mas levaram à conclusões diferentes. Xu e Kwok (1992), citados por Wang (2005), investigaram os movimentos provocados pelo vento de duas estruturas (um edifício de 76 andares e uma torre de 370 m), acoplados ao um AMS, levando em conta o efeito da complacência do solo sob a base da estrutura. Alegaram que a complacência do solo afetou as respostas estruturais, bem como a eficácia do AMS. Wu et al. (1999), citados por Wang (2005), focados no desempenho sísmico de um AMS para estruturas de fundações superficiais, realizaram investigações numéricas para um AMS de uma estrutura específica (com altura de 45 m), sistema construído em solos com diferentes velocidades de ondas de cisalhamento, e descobriram que a eficácia AMS diminui rapidamente a medida que o solo torna-se mais “mole” (menos rígido). Isto devido ao fato que todo o sistema de estrutura do solo se comporta mais como um sistema de amortecimento. Os esforços de Gao et al. (1996), citados por Wang (2005) mostraram que a AMS é um dispositivo de controle de vibração eficiente. No entanto, questionaram se o AMS era adequado para a aplicação, pois o modelo de semi-espaço elástico proposto não considerou as características de amortecimento do solo.

Como exemplo de amortecedores de massa sintonizados (Figura 2), tem-se o AMS que utiliza rolamentos de borracha de vários estágios, que lhe garante alto amortecimento, e são instalados em torres de antenas de micro-ondas para melhoria de sua resistência a ações sísmicas.

Figura 2 – AMS instalado em torre de antena.



Fonte: Masaki et al (2004).

Atualmente, um grande número de sistemas de controle passivo estão em uso para proteção de estruturas contra excitações sísmicas ou ações do vento. Estes dispositivos operam sem a necessidade de uma fonte de energia externa. Um sistema passivo típico não tem suas propriedades mecânicas modificadas em função da excitação de entrada. O sistema passivo utiliza o movimento da estrutura para produzir um movimento relativo nos dispositivos de amortecimento, pelo qual a energia é dissipada. Uma gama de mecanismos de amortecimento passivo empregados utilizam as mais diferentes técnicas de amortecimento, como: ação visco elástica em materiais do tipo borracha, fluxo de fluido, cisalhamento de fluido viscoso, vazão de fluido através de orifícios variáveis e atrito de deslizamento (SYMANS, 1994).

Como alternativa aos sistemas passivos existe os sistemas de controle ativos, que vêm sendo extensivamente estudados, principalmente em regiões com alta incidência de terremotos, como o caso do Japão. O funcionamento destes mecanismos ativos em geral requerem quantidades significativas de energia externa. Estes sistemas tipicamente ajustam as propriedades mecânicas da estrutura à qual estão interligadas com base na informação da excitação de entrada. Usualmente as forças de controle são aplicadas por atuadores eletro-hidráulicos que requerem fontes de energia da ordem de dezenas de quilowatts para sua operação. Ao modificar o nível de amortecimento em uma estrutura, os sistemas de controle ativos podem ser considerados sistemas ativos de dissipação de energia, devido ser esta sua ação primária, mas restritos a pequenas modificações de rigidez (SYMANS, 1994).

Com base nas considerações apresentadas, destaca-se a implementação de dispositivos híbridos que podem associar os benefícios de vários sistemas. Na Figura 3 mostra-se um AMS de pequeno porte aplicado à casas com estrutura de aço de 3 andares para controle de vibração induzida pelo tráfego de veículos. Consiste de duas unidades de massas com diferentes frequências naturais e um amortecedor magnético. A válvula magnética conecta as duas unidades de massa, e pode suprimir vibrações em uma faixa de frequências mais vasta do que um AMS isolado.

Figura 3 – Amortecedor híbrido para casas.



Fonte: Masaki et al (2004).

Outra alternativa para sistemas híbridos envolve os amortecedores magneto-reológicos (AMR). Os AMR são amortecedores viscosos que podem ter seu fator de amortecimento alterado instantaneamente. O fluido interno quando exposto a um campo magnético ou corrente elétrica, passa de um líquido de fluxo livre a um semissólido com intensidade de força controlável. Em geral, o amortecedor de fluido MR utiliza uma tensão de alimentação de 2 a 25 Volts, que podem ser proveniente de baterias. O MR vem sendo utilizado desde 1998, nos EUA, em suspensões de assento em caminhões e, recentemente, na produção de sistemas de suspensão para automóveis de passageiros (EL-KAFAY et al, 2012).

Os dispositivos de controle denominados semiativos têm recebido atenção significativa nos últimos anos por oferecerem a capacidade de adaptação dos dispositivos de controle de ativo sem exigirem grandes quantidades de energia. Os AMR são dispositivos de controle semiativos que utilizam fluidos MR para produzir amortecedores controláveis. Eles potencialmente oferecem uma operação altamente confiável e podem ser vistos como a prova de falhas, pois se tornam amortecedores passivos quando há algum mal funcionamento no sistema de controle.

Para o desenvolvimento de algoritmos de controle adequados para os amortecedores MR, os modelos matemáticos devem caracterizar adequadamente seu comportamento não-linear. O modelo Bouc-Wen proposto por Spencer et al. (1996) efetivamente retrata o comportamento de um amortecedor MR típico. Spencer et al. (1996) compararam os resultados experimentais de um amortecedor protótipo com vários modelos mecânicos idealizados para amortecedores de fluidos controláveis. Eles constataram que este modelo é adequado para uma ampla gama de condições de operação e, ainda adequado para a concepção de sistemas de controle e análises.

Para a redução de resposta em estruturas edificadas (Figura 4) sob ação de terremotos e ventos fortes, sistemas de controles passivos e ativos representam as duas extremidades da faixa de utilização de estratégias de sistemas suplementares de amortecimento. No entanto, sistemas de controle que combinam ambas características, oferecem a confiabilidade dos dispositivos passivos, aliadas a versatilidade e adaptabilidade dos sistemas ativos. Um dispositivo de controle semiativo pode ter suas propriedades ajustadas em tempo real, mas não pode introduzir energia no sistema controlado, pois tais dispositivos operam normalmente com potências baixas. Sistemas ativos operam principalmente para alterar o amortecimento estrutural, necessitando de potências elevadas em sua atuação. Como durante eventos sísmicos há grande probabilidade de se ter falhas da energia elétrica, devido a destruição de linhas de transmissões e unidades geradoras, caracteriza-se mais uma vantagem dos sistemas semiativos de baixa potência. Vários dispositivos semiativos têm sido propostos nas últimas décadas, onde utilizam forças geradas pelo atrito superficial ou fluidos viscosos para dissipar a energia vibratória em um sistema estrutural. Entre estes incluem-se: amortecedores de orifício variável, de cintas de atrito controláveis, isoladores de atrito controláveis e dispositivos de rigidez variável (SPENCER et al., 1996).

Figura 4 – Sistema de isolamento sísmica com amortecedor de viscosidade controlada usando fluido magneto-reológico (MR).



Fonte: Fujita (2016).

Muitos edifícios com base isolada foram construídos utilizando sistemas de isolamento passivo com a finalidade de reduzir as respostas das superestruturas durante terremotos. No entanto, grandes deslocamentos relativos são inevitáveis nos sistemas passivos para reduzir as acelerações destas superestruturas. A fim de resolver este problema, sistemas de isolamento

sísmico semiativos com um amortecedor de atrito controlável utilizando atuadores piezelétricos, amortecedor de atrito controlável utilizando sistema hidráulico conduzido por atuadores magnetostrictivos, que modificam suas características estruturais sob influência de um campo magnético, e amortecedor viscoso controlável utilizando um fluido magneto reológico (MR) foram desenvolvidos, devido a atuação na resposta do sistema ser mais rápida, e apresentaram grande eficácia para redução das acelerações e deslocamentos de resposta em estruturas de baixa escala (foram consideradas estruturas com até 3 andares, com 11 metros de altura). Para estruturas em grande escala (estruturas com 30 andares) foram apresentados de forma satisfatória resultados de simulações numéricas, que demostram também a eficácia dos mecanismos de isolamento sísmicos usando amortecedores controláveis semiativos (SATO, 2008).

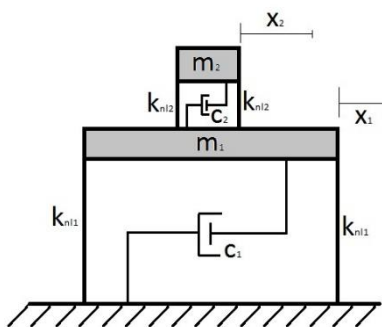
Contudo, faz-se necessária uma análise matemática e de estabilidade do sistema, em conjunto com o amortecedor de massa sintonizado, para posteriormente se acoplar o sistema de controle com o uso do amortecedor magneto-reológico. Esta análise é abordada na próxima seção.

3 MODELO PROPOSTO

Neste capítulo apresentam-se características dos métodos matemáticos. Apresentam-se as equações diferenciais ordinárias que regem o sistema mecânico equivalente; faz-se o estudo da estabilidade linear, através da análise da matriz Jacobiana e seus autovalores; apresenta o método de linearização; demonstra-se para a estrutura os planos de fases, sem excitação, sob excitação periódica e sísmicas Tajimi-Kanai, para o modelo adotado.

O modelo do absorvedor apresentado por Rana (1998) na figura 1, foi redesenhado, e adequado ao estudo proposto, afim de melhorar a visualização dos deslocamentos horizontais, x_1 e x_2 , e apresentados na figura 5.

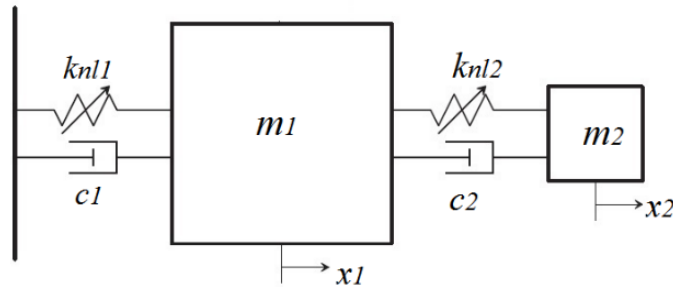
Figura 5 – Amortecedor de massa sintonizado acoplado a um oscilador não-linear.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com intuito de validar o modelo da figura 5 de acordo com a literatura, o modelo do sistema mecânico utilizado neste trabalho foi introduzido por Frahm (1909) e citado por Viguié e Kerschen (2009), e apresentado também por estes autores o conceito básico de um AMS considerando um acoplamento linear de um sistema massa mola e um oscilador não-linear. O sistema não linear resultante apresentado na Figura 6, foi proposto por Viguié e Kerschen (2009), possui dois graus de liberdade, e corresponde integralmente o modelo da figura 5, portanto o mesmo será adotado.

Figura 6 – Amortecedor de massa sintonizado acoplado a um oscilador não-linear.



Fonte: Adaptado de Viguié e Kerschen (2009).

Onde:

m_1 , k_{nl1} e c_1 : massa, rigidez e amortecimento do sistema principal, respectivamente;

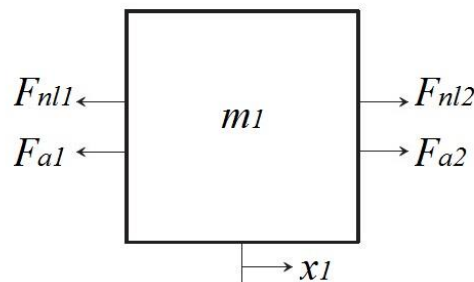
m_2 , k_{nl2} e c_2 : massa, rigidez e amortecimento do amortecedor de massa sintonizado (AMS), respectivamente;

$x_1(t)$: deslocamento do sistema principal em relação à base;

$x_2(t)$: deslocamento da massa m do AMS em relação à base;

A reação do elemento elástico principal é $\vec{F}_{knl1} = -k_{nl1}x_1^3$, do amortecedor principal $\vec{F}_{a1} = -c_1\dot{x}_1$, do elemento elástico secundário $\vec{F}_{knl2} = k_{nl2}x_1^3$ e do amortecedor secundário $\vec{F}_{a2} = c_2\dot{x}_1$. Destaca-se que o dispositivo considerado apresenta dependência cúbica do deslocamento proporcional à sua rigidez, que caracteriza o sistema linear mais simples que mantém uma relação correta entre o modelo matemático e modelo físico. Para clareza do entendimento, apresenta-se na Figura 7 o diagrama de corpo livre do sistema principal:

Figura 7 – Diagrama de corpo livre do sistema principal.



Fonte: elaborado pelo autor.

Aplica-se a segunda lei do movimento de Newton à massa apresentada no diagrama de corpo livre. Esta lei pode ser enunciada como: *a taxa de variação do momento linear é igual à força que age sobre a massa* (RAO, 2012).

Assim, se a massa m for deslocada por uma distância $x(t)$ quando aplicada uma força resultante $F(t)$ na mesma direção, a segunda lei do movimento de Newton resulta em:

$$\vec{F}(t) = \frac{d}{dt} \left(m \frac{d\vec{x}(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

Como a massa m é constante no modelo proposto, essa equação se reduz a

$$\vec{F}(t) = \frac{d}{dt} \left(m \frac{d\vec{x}(t)}{dt} \right) = m\ddot{\vec{x}} \quad (2)$$

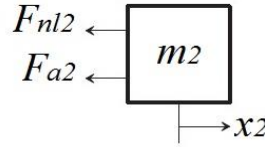
Logo a somatória das forças que atuam no diagrama de corpo livre apresentado, é igual o produto de sua massa por sua aceleração. Aplica-se então a segunda lei de Newton ao modelo proposto. Como a massa menor também está se movendo, haverá um movimento relativo, entre as massas, logo é necessário subtrair o deslocamento do AMS para as forças da mola secundária e do amortecedor secundário, e considerando x_2 maior do que x_1 então tem-se:

$$m_1\ddot{x}_1 = -c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_{nl1}x_1^3 + k_{nl2}(x_2 - x_1)^3 \quad (3)$$

Reorganizando a equação 1 temos:

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{nl1}x_1^3 + k_{nl2}(x_1 - x_2)^3 \quad (4)$$

Para o segundo corpo, considerando o deslocamento do corpo maior, a força resultante é dada pela somatória das reações $F_{a2} = -c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$, $F_{knl2} = -k_{nl2}(x_2 - x_1)^3$, de acordo com o diagrama mostrado na Figura 8:

Figura 8 – Diagrama de corpo livre do AMS.

Fonte: elaborado pelo autor.

A equação do movimento para o AMS é:

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{nl_2}(x_2 - x_1)^3 = 0 \quad (5)$$

O sistema de equações diferenciais não lineares, segundo a mecânica Newtoniana finalmente obtido é:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{nl_1} x_1^3 + k_{nl_2}(x_1 - x_2)^3 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{nl_2}(x_2 - x_1)^3 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Com intuito de demonstrar que as equações do movimento poderiam ser obtidas por outros métodos, sendo um deles o método de Euler-Lagrange, que constitui uma formulação alternativa, reescrita de maneira equivalente, em termos da energia cinética do corpo e da energia potencial, segundo Monteiro (2011), tem-se:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}} = 0 \quad (7)$$

onde T é a energia cinética do sistema, U é a energia potencial, E_d são as energias dissipativas associadas ao sistema, $\dot{q}$ e q são as coordenadas generalizadas, que correspondem as coordenadas x_1 e x_2 da mecânica Newtoniana.

A energia cinética (T) total do sistema é:

$$T = \frac{1}{2} [m_1 \dot{q}_1^2 + m_2 \dot{q}_2^2] \quad (8)$$

Similarmente, a energia potencial (U) total do sistema é:

$$U = \frac{1}{2} [k_{nl1} q_1^2 + k_{nl2} (q_2 - q_1)^2] \quad (9)$$

Ainda, a energia dissipativa (E_d) total do sistema é:

$$E_d = \frac{1}{2} [c_1 \dot{q}_1^2 + c_2 (\dot{q}_2 - \dot{q}_1)^2] \quad (10)$$

Logo, a equação de Lagrange para massa m_1 é:

$$m_1 \ddot{q}_1 + c_1 \dot{q}_1 + c_2 (\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + k_{nl1} (q_1^3) + k_{nl2} (q_1 - q_2)^3 = 0 \quad (11)$$

Também a equação de Lagrange para m_2 é:

$$m_2 \ddot{q}_2 + c_2 (\dot{q}_2 - \dot{q}_1) + k_{nl2} (q_2 - q_1)^3 = 0 \quad (12)$$

Aplicando os conceitos teóricos de Euler-Lagrange, em termos de energias do sistema, chega-se às equações (11) e (12), que correspondem ao sistema de equações (6), que foram obtidos aplicando a teoria Newtoniana de somatório de forças. Logo, como se sabe, podem ser utilizados quaisquer um dos procedimentos para se obter as equações do movimento e, finalmente, estudar o comportamento de estabilidade estrutural do sistema. Foram novamente utilizadas as equações Newtonianas para as análises a seguir.

3.1 REDUÇÃO DE ORDEM DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS

Para facilitar as análises é possível transformar o sistema de equações em um sistema de primeira ordem. Para isso, sejam:

$$\dot{x}_1 = x_3 \quad (13)$$

$$\dot{x}_2 = x_4 \quad (14)$$

Desse modo, derivando ambos em relação à t :

$$\dot{x}_3 = \ddot{x}_1 \quad (15)$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{x}_2 \quad (16)$$

Substituindo as equações (13), (14), (15) e (16), no sistema de equações (6), isolando as derivadas em cada uma das equações e adicionando as novas variáveis ao sistema, tem-se:

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = -\frac{c_1}{m_1}x_3 - \frac{c_2}{m_1}(x_3 - x_4) - \frac{k_{nl1}}{m_1}x_1^3 - \frac{k_{nl2}}{m_1}(x_1 - x_2)^3 \\ \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_4 = -\frac{c_2}{m_2}(x_4 - x_3) - \frac{k_{nl2}}{m_2}(x_2 - x_1)^3 \\ \dot{x}_2 = x_4 \end{cases} \quad (17)$$

Após a redução de ordem do sistema de equações diferenciais se faz a linearização em torno dos pontos de equilíbrio afim de facilitar os cálculos envolvidos.

3.2 PONTOS DE EQUILÍBRIO

Nesta secção apresenta-se a metodologia usada na solução das equações governantes do problema. As equações são linearizadas usando o controle de estabilidade baseados nos expoentes de Lyapunov obtidos usando-se o método de Wolf, sendo o método mais utilizado para tal propósito, servindo como referência a diversas pesquisas.

A linearização é feita em torno dos seus pontos de equilíbrio. Pela definição, nos pontos de equilíbrio, as derivadas de cada variável tende a zero, portanto ao ponto de equilíbrio estático, logo tem-se (RAO, 2012):

$$\left. \frac{dx_1(t)}{dt} \right|_{x_1=x_1^*} = \left. \frac{dx_2(t)}{dt} \right|_{x_2=x_2^*} = \left. \frac{dx_3(t)}{dt} \right|_{x_3=x_3^*} = \left. \frac{dx_4(t)}{dt} \right|_{x_4=x_4^*} = 0 \quad (18)$$

sendo o ponto de equilíbrio $P = (x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$. Isso significa, que a velocidade da evolução temporal de cada uma das grandezas $x_i(t)$, em todas as dimensões do espaço de fases, é igual a zero nestes pontos. Na forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

ou seja, o sistema de equações 17 igualado a zero e reordenado como demonstrado a seguir

$$\begin{cases} x_1^* = 0 \\ x_3^* = 0 \\ x_2^* = 0 \\ x_4^* = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1^* = 0 \\ x_2^* = 0 \\ x_3^* = 0 \\ x_4^* = 0 \end{cases} \quad (20)$$

Então se chega à seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} -\frac{c_1}{m_1}x_3^* - \frac{c_2}{m_1}(x_3^* - x_4^*) - \frac{k_{nl1}}{m_1}(x_1^*)^3 - \frac{k_2}{m_1}(x_1^* - x_2^*)^3 \\ -\frac{c_2}{m_2}(x_4^* - x_3^*) - \frac{k_2}{m_2}(x_2^* - x_1^*)^3 \\ x_3^* \\ x_4^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Logo, tem-se:

$$x_3^* = x_4^* = 0 \quad (22)$$

Desse modo, o sistema de equações se torna:

$$\begin{cases} -\frac{k_{nl1}}{m_1}(x_1^*)^3 + \frac{k_{nl2}}{m_1}(x_1^* - x_2^*)^3 = 0 \\ \frac{k_{nl2}}{m_2}(x_1^* - x_2^*)^3 = 0 \\ x_3^* = 0 \\ x_4^* = 0 \end{cases} \quad (23)$$

3.3 LINEARIZAÇÃO

Para as simulações numéricas foram adotados os parâmetros físicos apresentados na Tabela 1, segundo Viguié e Kerschen (2009). Observa-se que a massa m_1 possui valor unitário,

a fim de facilitar as simulações numéricas, e que a massa m_2 é uma pequena parcela de m_1 , pois a efeitos de ordem prática é desejável que o AMS possua massa muito inferior do que a estrutura principal.

Tabela 1 – Parâmetros do sistema

Símbolo	Valor	Unidade
c_1	0,02	Ns/m
m_1	1	Kg
c_2	0,02	Ns/m
m_2	0,05	Kg

Fonte: Viguié e Kerschen (2009)

Considerando $\dot{x}_1 = p(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$, $\dot{x}_2 = q(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$, $\dot{x}_3 = r(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$ e $\dot{x}_4 = s(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$, onde cada linha da matriz Jacobiana corresponde a uma linha da matriz 23, e que àquelas equações escritas em função das coordenadas do ponto de equilíbrio $(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$ são derivadas parcialmente em função de cada variável para a montagem da matriz Jacobiana. Logo o sistema pode ser linearizado pela série de Taylor em torno do ponto de equilíbrio que, ainda, pode ser truncada após os termos de ordem primária:

$$\dot{x}_1 = \frac{\partial p(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_1} x_1 + \frac{\partial p(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_2} x_2 + \frac{\partial p(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_3} x_3 + \frac{\partial p(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_4} x_4 \quad (24)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\partial q(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_1} x_1 + \frac{\partial q(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_2} x_2 + \frac{\partial q(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_3} x_3 + \frac{\partial q(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_4} x_4 \quad (25)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{\partial r(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_1} x_1 + \frac{\partial r(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_2} x_2 + \frac{\partial r(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_3} x_3 + \frac{\partial r(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_4} x_4 \quad (26)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{\partial s(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_1} x_1 + \frac{\partial s(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_2} x_2 + \frac{\partial s(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_3} x_3 + \frac{\partial s(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)}{\partial x_4} x_4 \quad (27)$$

Na forma matricial, tem-se, analogamente:

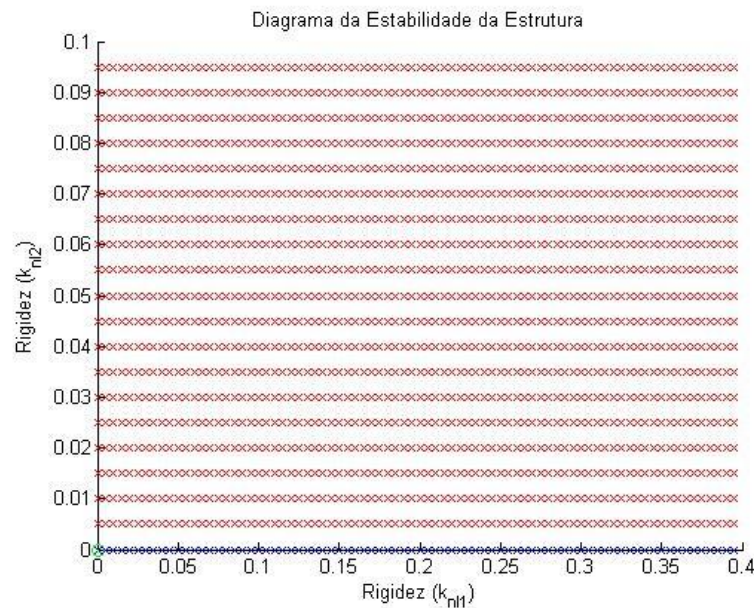
$$\frac{d\vec{x}}{dt} = J\vec{x}(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x_1} & \frac{\partial p}{\partial x_2} & \frac{\partial p}{\partial x_3} & \frac{\partial p}{\partial x_4} \\ \frac{\partial q}{\partial x_1} & \frac{\partial q}{\partial x_2} & \frac{\partial q}{\partial x_3} & \frac{\partial q}{\partial x_4} \\ \frac{\partial r}{\partial x_1} & \frac{\partial r}{\partial x_2} & \frac{\partial r}{\partial x_3} & \frac{\partial r}{\partial x_4} \\ \frac{\partial s}{\partial x_1} & \frac{\partial s}{\partial x_2} & \frac{\partial s}{\partial x_3} & \frac{\partial s}{\partial x_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Portanto, a matriz Jacobina do sistema linearizado por séries de Taylor em torno do ponto de equilíbrio é:

$$J = \begin{bmatrix} -3x_1^2 k_{nl1} - 3(x_1 - x_2)^2 k_{nl2} & 3(x_1 - x_2)^2 k_{nl2} & -\frac{1}{250} & \frac{1}{500} \\ 60(x_1 - x_2)^2 k_{nl2} & -60(x_1 - x_2)^2 k_{nl2} & \frac{1}{25} & -\frac{1}{25} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

3.4 ESTABILIDADE DO SISTEMA

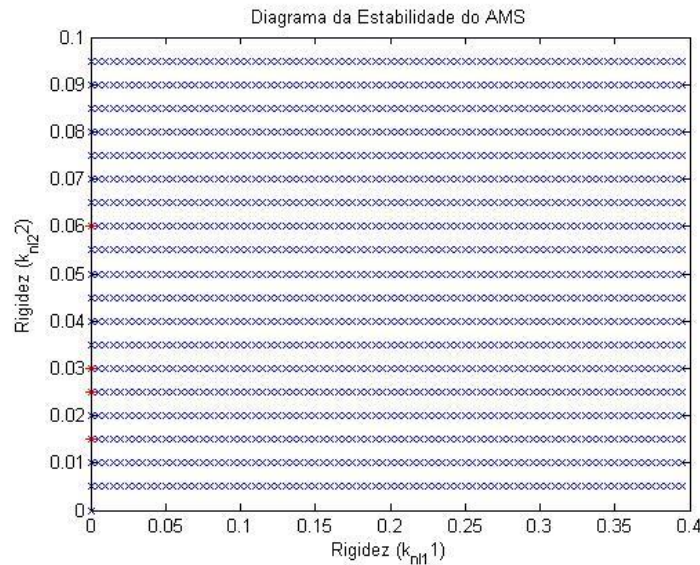
A partir dos autovalores da matriz Jacobiana do sistema, analisa-se e classifica-se, o tipo de estabilidade ou instabilidade para diversos valores de rigidez, para cada combinação de k_{nl1} e k_{nl2} , entre 0 à 0,4 e 0 à 0,1, respectivamente, para estudo da estabilidade/instabilidade. A estabilidade segundo Lyapunov é demonstrada nas Figuras 9 e 10 a seguir, com as seguintes condições iniciais: $x_1 = 1$, $x_2 = 0$, $x_3 = 0$ e $x_4 = 0$.

Figura 9 – Estabilidade da estrutura principal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Utilizando o software Octave, foi implementado um algoritmo, e com base na classificação de Lyapunov dos autovalores que foram calculados a partir da matriz Jacobiana, foi possível obter o diagrama observado na Figura 9, no qual o sistema principal é estável, para toda a faixa de variação da rigidez (símbolos “x” vermelhos). Nos pontos marcados por asteriscos azuis correspondem aos pontos de nulidade, e corresponde também a pontos de estabilidade. O ponto marcado com um círculo verde, também é um ponto estável e demonstra um dos pontos de equilíbrio do sistema.

Na Figura 10 pode ser observado o diagrama de estabilidade/instabilidade para o AMS em função da variação de rigidez do sistema. Verifica-se os pontos marcados por símbolos “x” azuis como sendo pontos de estabilidade do AMS. Nos pontos marcados com asteriscos vermelhos correspondem pontos de instabilidade do sistema.

Figura 10 – Estabilidade do AMS.

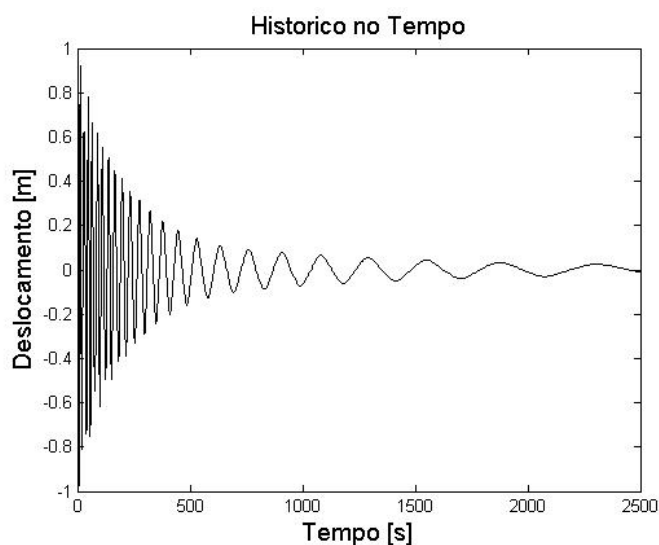
Fonte: elaborada pelo autor.

Aos pontos de estabilidade estão associadas as condições em que a estrutura não está em colapso. Portanto, mantém-se estruturalmente com suas condições físicas originais. Aos pontos de instabilidade estão associados condições em que a estrutura entra em colapso, tendo sua integridade física comprometida. Como fisicamente toda estrutura possui uma rigidez não nula, estes pontos de instabilidade podem ser desconsiderados. Com esta análise consegue-se comprovar que o sistema principal e o AMS são estruturalmente estáveis.

Apresenta-se a seguir as Figuras 11, 12, 13, 14 e 15 que representam a resposta da estrutura sem excitação periódica considerando condições iniciais para deslocamento, $x_1 = 1$, $x_2 = 0$, $x_3 = 1$ e $x_4 = 0$, e para a rigidez, $k_{nl1} = 0.1$ e $k_{nl2} = 0.0025$, também considerados estes parâmetros de rigidez de forma arbitrária. Os valores do coeficiente de amortecimento e da massa correspondem aos apresentados na Tabela 1.

A Figura 11 apresenta o deslocamento em função do tempo, aplicando se o sistema de equações 6, mostrando que após uma perturbação inicial (condições iniciais citadas anteriormente), o sistema que tem comportamento estável para as condições aplicadas, conforme discutido anteriormente, retorna a posição de origem (ponto de equilíbrio estável).

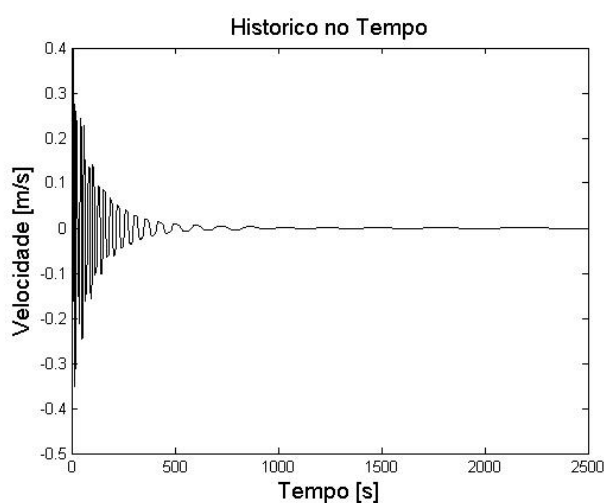
Figura 11 – Resposta da estrutura sem excitação – deslocamento versus tempo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 12 apresenta a velocidade em função do tempo, que novamente demonstra o retorno a posição de equilíbrio. Para obter estes resultados foi utilizado o método de integração numérica Runge-Kutta, com o passo de 0,1 e 250 segundos, no qual corresponde a 2500 pontos no eixo das abscissas (tempo) do gráfico. Esta quantidade de pontos foi definida afim de se observar o comportamento transiente, aproximadamente até por volta de 500 pontos, e o regime permanente, entre 500 e 2500 pontos.

Figura 12 – Resposta da estrutura sem excitação – velocidade versus tempo.

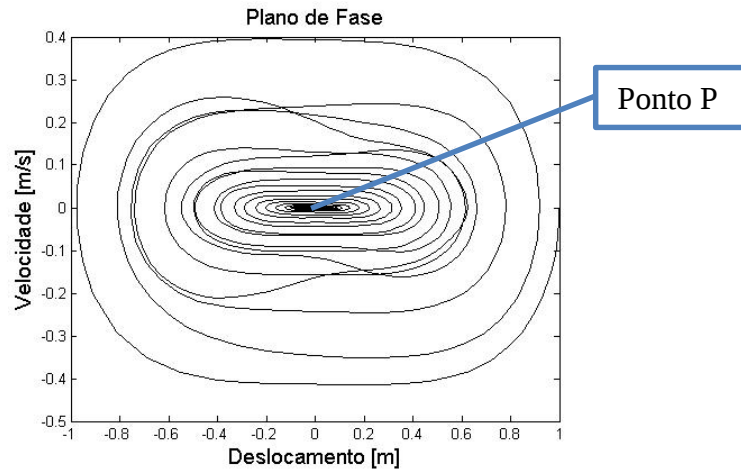


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 13 apresenta o plano de fase, que é a relação entre as coordenadas generalizadas velocidade e deslocamento, que são coordenadas necessárias para descrever o

movimento de um sistema. Comprova-se que o sistema é estável, uma vez que retorna ao ponto $P = (x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$.

Figura 13 – Resposta da estrutura sem excitação – plano de fase.



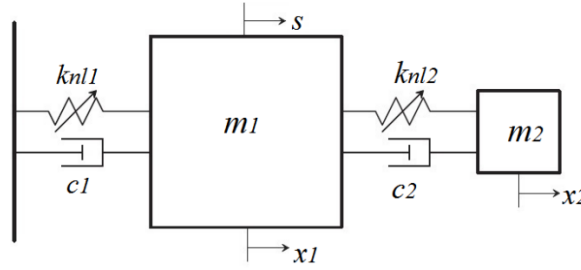
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Finaliza-se o estudo da estabilidade do sistema sem excitações externas. As próximas secções apresentaram o sistema sob influência de excitações periódicas e sísmicas.

3.5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COM EXCITAÇÃO PERIÓDICA

Nesta secção apresenta-se os resultados das simulações numéricas incluindo uma excitação externa que representa a ação do ambiente sob a estrutura, como por exemplo, ventos. Considera-se a forma $S = A \sin(wt)$, assumindo os seguintes valores para os parâmetros $A = 0,5 * 10^{-2} [m]$ e $w = 1 [rad/s]$, os quais foram considerados de forma arbitrária, sendo uma excitação de baixa amplitude e frequência. A excitação é aplicada sobre a estrutura principal, conforme ilustra a Figura 15 (RAO, 2012).

Figura 14 – Estrutura principal sob ação de excitação periódica.



Fonte: Viguié e Kerschen (2009).

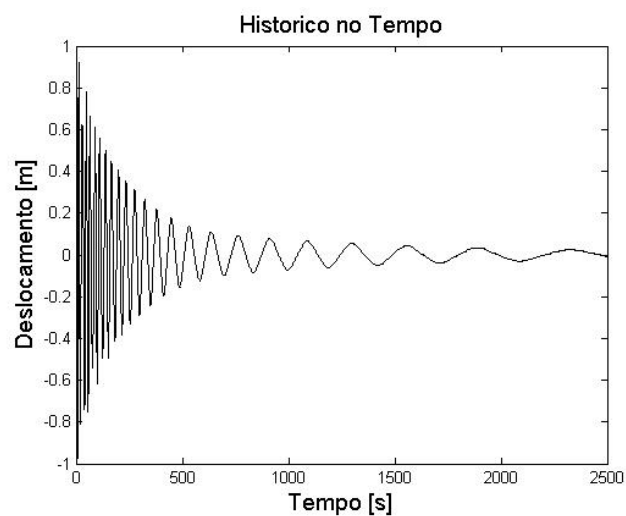
Após considerar a excitação periódica as equações do movimento são reescritas da seguinte forma:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{nl1} x_1^3 + k_{nl2} (x_1 - x_2)^3 = -\ddot{S} m_1 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{nl2} (x_2 - x_1)^3 = 0 \end{cases} \quad (30)$$

As Figuras 16 a 22 representam as respostas da estrutura à excitação periódica de acordo com a função S definida e com condições iniciais para deslocamento sendo, $x_1 = 1[m]$, $x_2 = 0$, $x_3 = 1 [m]$ e $x_4 = 0$; rigidez, $k_{nl1} = 0,1 \left[\frac{N}{m} \right]$ e $k_{nl2} = 0,0025 \left[\frac{N}{m} \right]$; $m_1 = 1[kg]$ e $m_2 = 0,05[kg]$; $c_1 = 0,02 \left[\frac{Ns}{m} \right]$ e $c_2 = 0,02 \left[\frac{Ns}{m} \right]$.

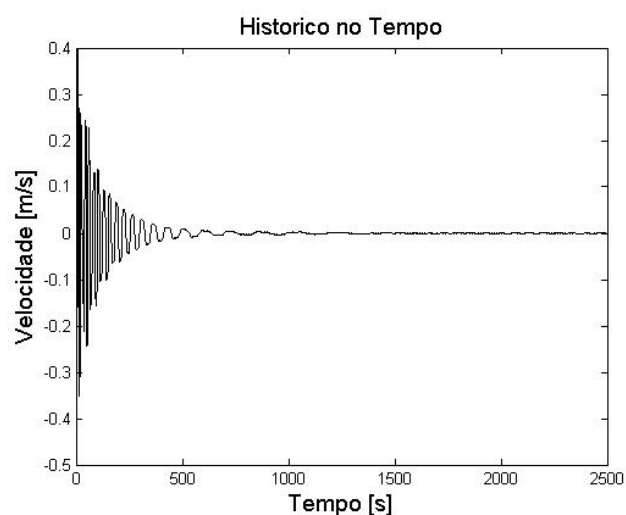
A Figura 16 apresenta a estrutura principal sob ação de uma excitação periódica. Em que após a perturbação inicial, tem-se uma oscilação de magnitude mais elevada, depois continua a oscilar, mais com uma amplitude pequena, devido ao efeito atenuador do amortecedor de massa sintonizada (AMS). Similarmente, a Figura 17 apresenta a velocidade em função do tempo para a estrutura principal, sob ação de uma excitação periódica.

Figura 15 – Resposta da estrutura principal sob excitação periódica.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

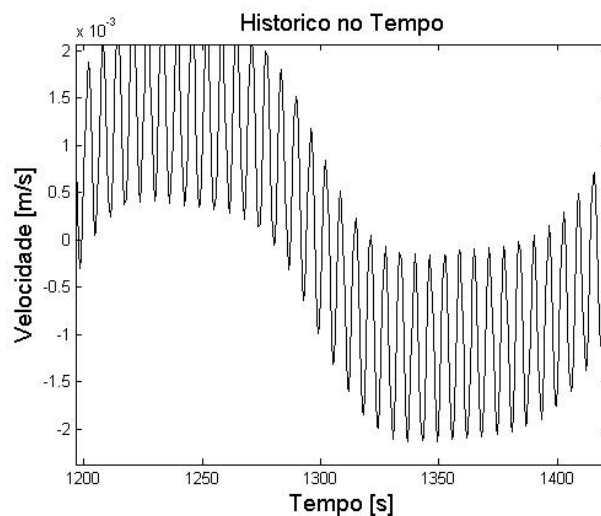
Figura 16 – Estrutura sob excitação periódica – velocidade em função do tempo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ainda, a Figura 18 representa o gráfico da Figura 17 em região ampliada para clareza de entendimento da magnitude da velocidade. Nota-se a permanência de uma pequena amplitude de velocidade oscilatória para o intervalo de tempo apresentado.

Figura 17 – Velocidade da estrutura em função do tempo – versão ampliada.

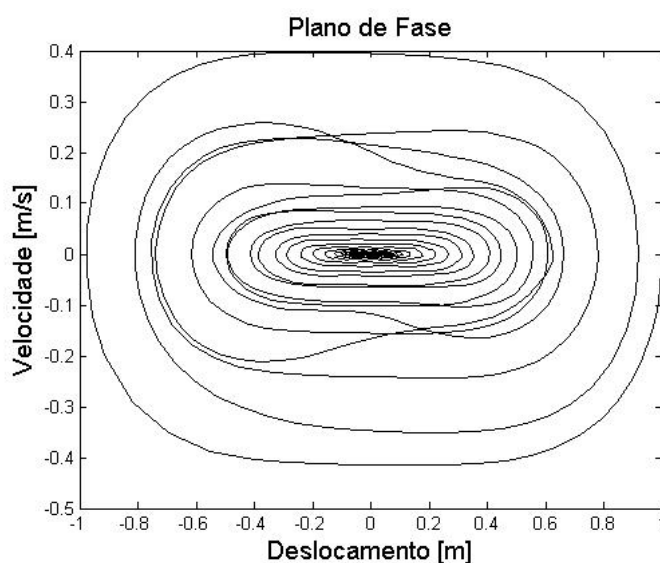


Fonte: Elaboração do próprio autor.

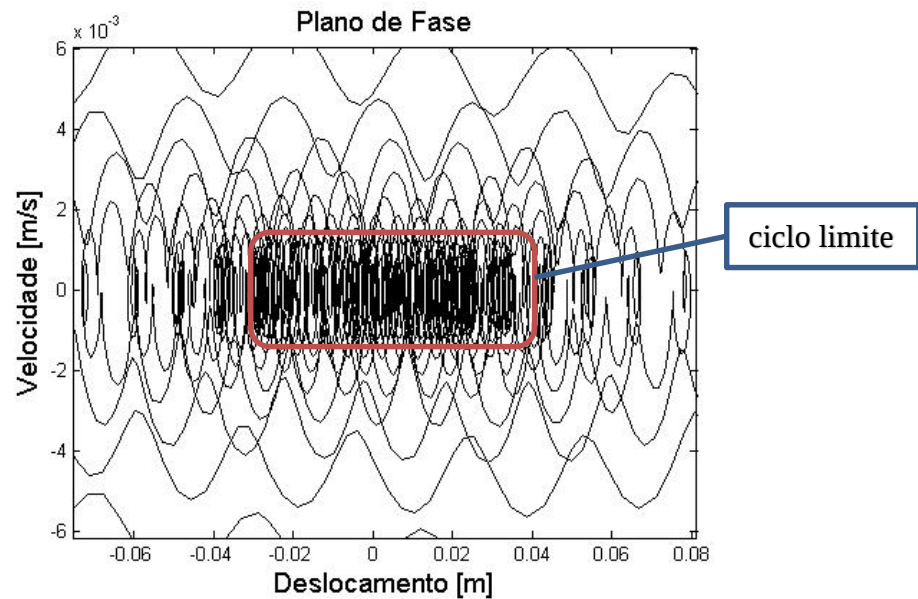
Observa-se na figura 18 o intervalo entre os pontos 1200 e 1400, que corresponde no gráfico apresentado na figura 17, o regime permanente, que demonstra que a estrutura continua sob influência de uma excitação periódica.

A Figura 19 apresenta o plano de fase para a estrutura sob excitação periódica. Este resultado é reapresentado na Figura 20 em região ampliada. Nota-se claramente a permanência de uma pequena ciclo limite para o intervalo de tempo apresentado, pois permanece sob uma oscilação periódica definida pela função S, apresentada na figura 15.

Figura 18 – Plano de fase – estrutura sob excitação periódica.



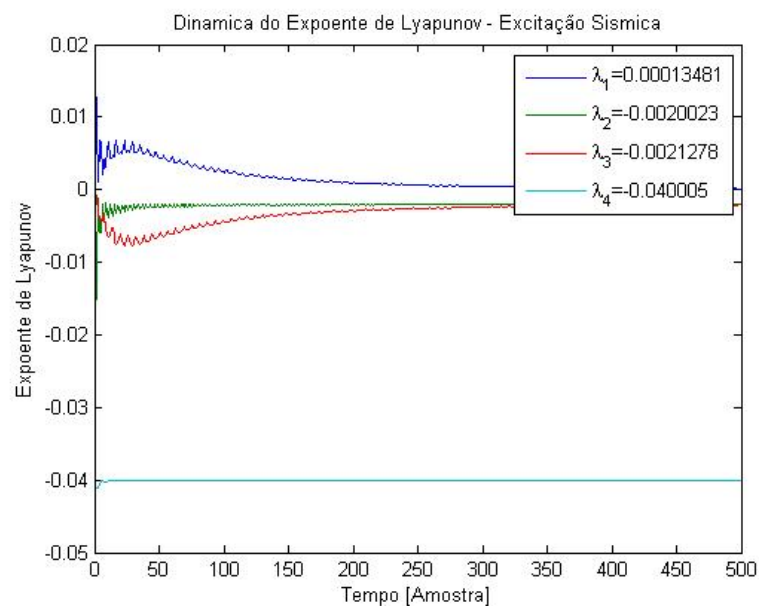
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 19 – Plano de fase – versão ampliada

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se na figura 20 o ciclo limite, que demonstra que a estrutura não retorna mais a um ponto único, P , pois ainda está sob influência de um função periódica, S . Portanto continua com um pequeno deslocamento e velocidade.

Finalmente, a Figura 21 apresenta o gráfico com os expoentes de Lyapunov próximos de zero. Estes resultados confirmam as soluções periódicas encontradas.

Figura 20 – Expoentes de Lyapunov – estabilidade estrutural.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.6 EXCITAÇÃO SÍSMICA

Conforme apresentado anteriormente, o presente trabalho visa mediante simulação numérica, utilizando o software Octave, demonstrar a eficiência de um amortecedor de massa sintonizado aplicado a uma estrutura sob influência de oscilações sísmicas. Então nesta secção este efeito é inserido através do modelo de Kanai-Tajimi (KANAI, 1957). O modelo Kanai-Tajimi descreve registros temporais do movimento do solo e compreende frequências e amplitudes não estacionárias (aleatórias). 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 base os sismos ocorridos no Irã, nas cidades de Naghan em 1977, Tabas em 1978 e Manjil em 1990. O modelo é capaz 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 de rerepresentação ao se comparar como os registros reais (ROFOOEI et al., 2001).

3.6.1 O modelo de Tajimi-Kanai

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, portanto denominado Tajimi-Kanai, tem sido aplicado usualmente em análises, em que se pretende, através de simulação numérica, observar o comportamento de estruturas sob influência de excitações sísmicas. A excitação sísmica gerada pela equação apresentada a seguir é considerada uma excitação do tipo ruído branco, uma vez que abrange uma ampla faixa de frequências. Sua forma original é idealizada como um processo aleatório estacionário, ou seja, suas características estatísticas não mudam com o tempo

O referido modelo é dado por:

$$S_g(f) = \frac{1 + \xi_g^2(f/f_g)^2}{[1 - (f/f_g)^2]^2 + (2\xi_g f/f_g)^2} S_0 \quad (31)$$

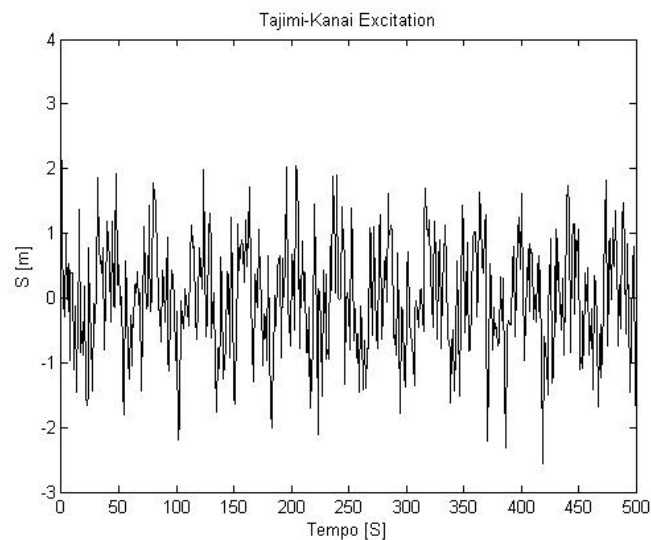
onde os parâmetros são descritos como se segue: $S_g(f)$ representa a densidade espectral de aceleração em função da frequência f ; f_g é a frequência característica dos mantos de solo

local; ξ_g é a razão do amortecimento dos mantos do solo local; e S_0 é a intensidade do ruído branco (KANAI, 1957).

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.

A Figura 22 apresenta o comportamento no tempo de uma excitação do tipo Tajimi-Kanai, que foi obtido através da aplicação da equação 28, em um algoritmo escrito no software Octave.

Figura 21 – Excitação do Tipo Tajimi-Kanai.

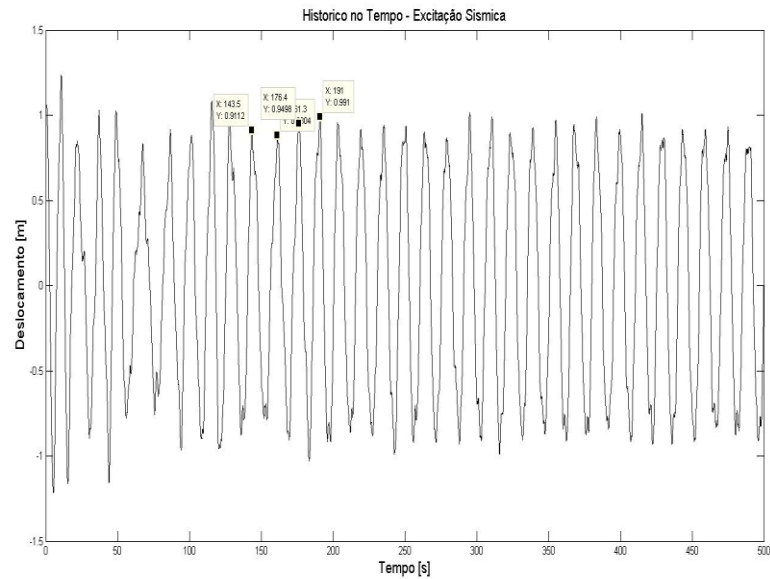


Fonte: Elaborado pelo próprio Autor.

3.6.2 Simulações numéricas com excitação sísmica

Neste tópico, apresentam-se resultados das simulações numéricas aplicando a excitação sísmica do tipo Tajimi Kanai (KANAI, 1957). As Figuras 23, 24, 25 e 26, a seguir, ilustram o comportamento do modelo proposto com a excitação sísmica, de acordo com as equações do movimento 30.

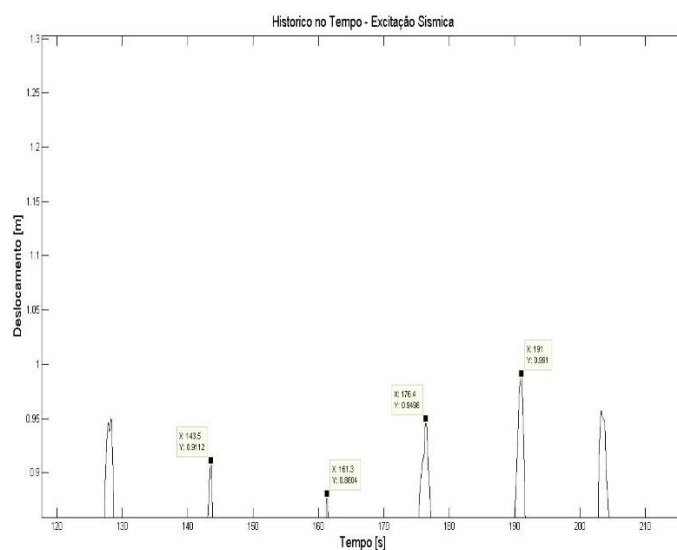
Figura 22 – Excitação sísmica – deslocamento versus tempo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se na figura 23 o deslocamento em função do tempo, para o sistema principal sob efeito da excitação sísmica. Os pontos marcados do gráfico são ampliados na figura 24 afim de melhorar a visualização, os quais demonstram tanto diferenças de amplitude (eixo y), como variação no intervalo de tempo entre um pico e outro (eixo x).

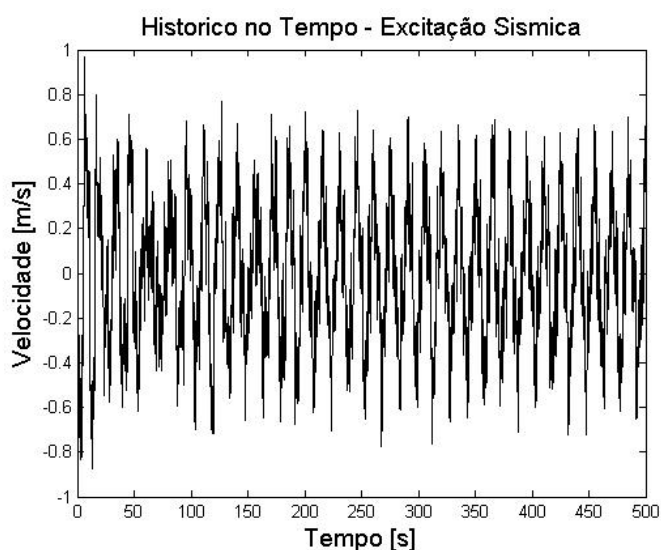
Figura 23 – Excitação sísmica – deslocamento versus tempo - ampliado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se na figura 24 os pontos cartesianos (143.5,0.9112), (161.3,0.8804), (176.4,0.9498), (191,0.991). Ao se fazer a subtração do tempo entre picos sequenciais, obtém-se o período de oscilação. Observa-se que todos os picos sequenciais tem variação do intervalo de tempo, portanto variação do período, e por consequência, variação na frequência. Fica então caracterizado uma excitação aleatória, tanto em frequência quanto em amplitude.

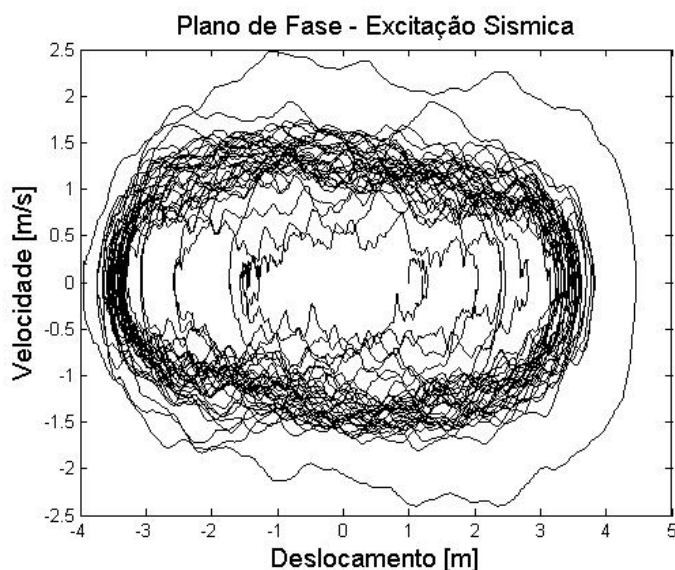
Figura 24 – Excitação sísmica – velocidade versus tempo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A figura 25 demonstra a velocidade em função do tempo para estrutura principal.

Figura 25 – Excitação sísmica – plano de fase da estrutura.

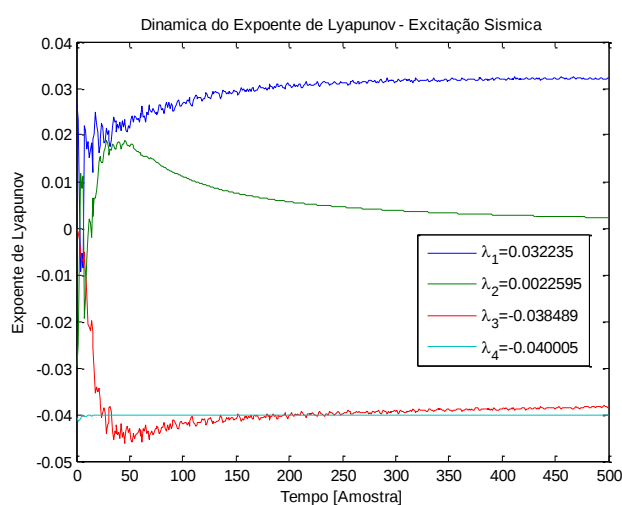


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se na figura 26 que o sistema não apresenta mais um comportamento estável, pois não retorna a um ponto de equilíbrio, devido à aplicação da excitação do tipo Tajimi-Kanai, por isso faz-se necessário o cálculo do expoente de Lyapunov através de um algoritmo proposto por Wolf, e denominado método de Wolf, para a verificação do comportamento caótico (WOLF et al, 1985).

A Figura 27 mostra a evolução do comportamento dos expoentes de Lyapunov sendo: $\lambda_1 = 0,032$, $\lambda_2 = 0,002$, $\lambda_3 = -0,038$ e $\lambda_4 = -0,04$.

Figura 26 – Excitação sísmica – dinâmica do expoente de Lyapunov.

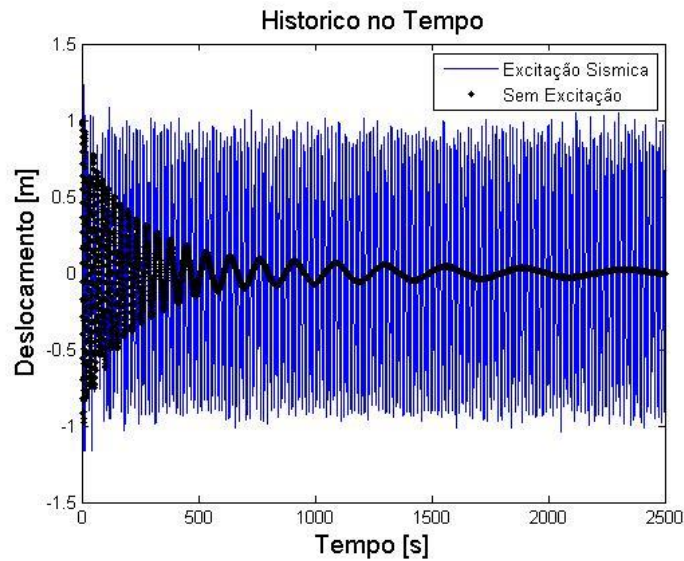


Fonte: Elaboração do próprio autor.

O valor de um expoente de Lyapunov, λ_1 , positivo, segundo Savi (2006), 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.

As Figuras, 28 e 29, apresentam um comparativo entre a estrutura sob influência de excitação sísmica (em azul) em relação a estrutura com apenas excitação periódica (em preto).

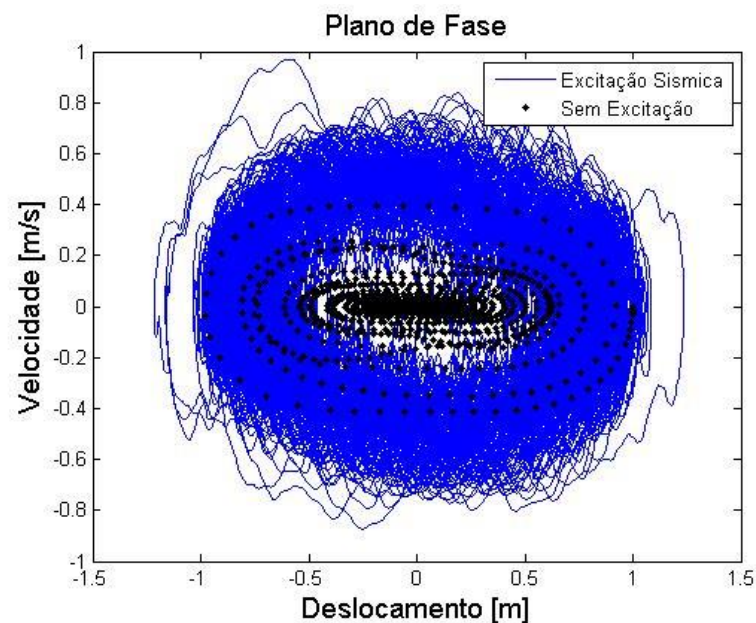
Figura 27 – Estrutura sob excitação sísmica versus sem excitação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A figura 28 demonstra o deslocamento em função do tempo, tanto para estrutura sob excitação sísmica (em azul) quanto para estrutura apenas com excitação periódica (em preto).

Figura 28 – Estrutura sob excitação sísmica versus sem excitação – plano de fase.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A figura 29 apresenta o plano de fase, velocidade em relação ao deslocamento, tanto para estrutura sob excitação sísmica (em azul) quanto para estrutura apenas com excitação periódica (em preto).

Como a estrutura não demonstra mais um comportamento estável, se faz necessário a aplicação de técnicas de controle que façam com que a estrutura permaneça íntegra sob efeito de uma excitação sísmica. É abordada no próximo capítulo a aplicação do amortecedor magneto reológico com esse intuito.

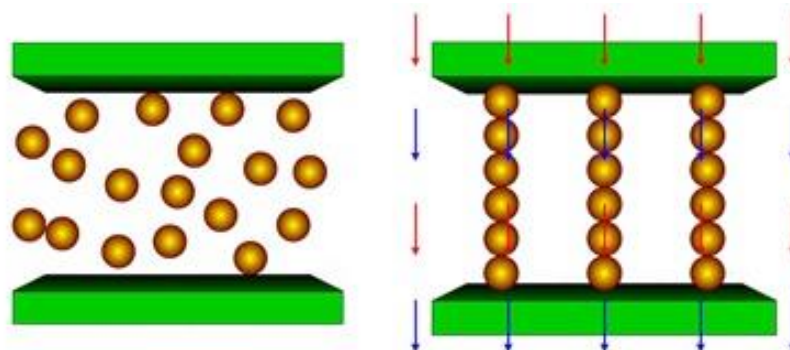
4 MODELO E COMPORTAMENTO DO AMORTECEDOR MR

Neste capítulo, apresenta-se o modelo de controle estrutural, através do uso do amortecedor magneto reológico (AMR).

Os AMR são amortecedores viscosos que podem ter seu fator de amortecimento alterado instantaneamente. O fluido interno quando exposto a um campo magnético ou corrente elétrica, passa de um líquido de fluxo livre a um semissólido com intensidade de força controlável.

Normalmente o fluido magneto reológico são líquidos de escoamento livre, tendo a consistência semelhante à do óleo de motor. No entanto, sob a aplicação de um campo magnético, as partículas de ferro se alinham com o campo externo, o que faz as partículas formarem cadeias lineares paralelas ao campo, conforme a Figura 30 (TRUONG E AHN, 2012). Portanto possuem uma alta viscosidade quando aplicado um campo magnético, e baixa viscosidade quando não está magnetizado.

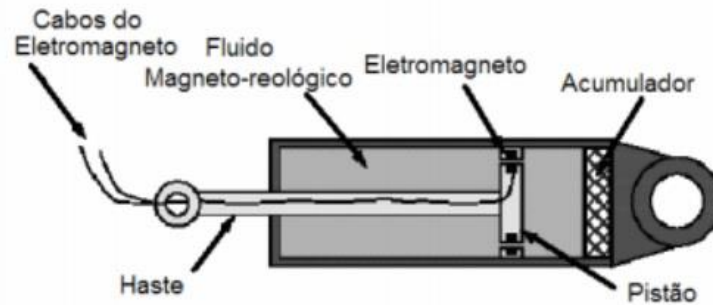
Figura 29 – Comportamento fluido magneto reológico.



Fonte: Truong e Ahn (2012).

A Figura 31 mostra o diagrama esquemático de um AMR. Este possui duas câmaras como um amortecedor convencional, no qual o fluido viscoso magneto reológico passa de uma para a outra quando o conjunto haste-pistão sofre alguma excitação externa, de deslocamento e/ou velocidade. Sob o efeito do eletromagneto/bobina o fluido viscoso MR têm sua passagem controlada, facilitada ou dificultada, devido a ação do campo magnético em suas propriedades de escoamento, ou seja, em sua viscosidade.

Figura 30 – Esquemático amortecedor magneto reológico.



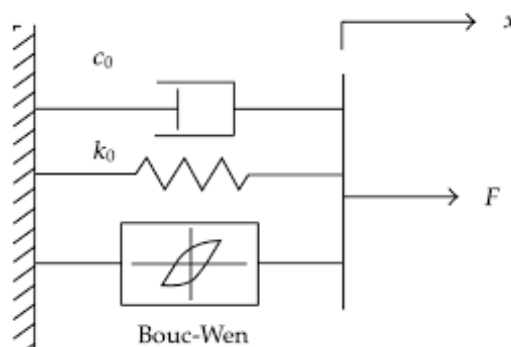
Fonte: De Lima et al. (2010).

Os AMR são dispositivos de controle semiativos que utilizam fluidos MR para produzir amortecedores controláveis. Os dispositivos de controle denominados semiativos têm recebido atenção significativa nos últimos anos por oferecerem a capacidade de adaptação dos dispositivos de controle de ativo sem exigirem grandes quantidades de energia. Eles potencialmente oferecem uma operação altamente confiável e podem ser vistos como a prova de falhas, pois se tornam amortecedores passivos quando há algum mal funcionamento no sistema de controle (Spencer et al, 1996).

4.1 MODELO DE BOUC-WEN PARA AMORTECEDOR MR

Para o desenvolvimento de algoritmos de controle adequados para os amortecedor MR, os modelos matemáticos devem caracterizar adequadamente seu comportamento não-linear. O modelo Bouc-Wen proposto por Spencer et al. (1996), e representado na Figura 32, efetivamente retrata o comportamento de um amortecedor MR típico.

Figura 31 – Modelo Bouc-Wen.



Fonte: Spencer et al. (1996).

A força F do sistema é determinada por:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad (32)$$

Sendo que z é obtido da equação:

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| |z| |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (33)$$

Onde:

x_0 deslocamento inicial $[m]$

k_0 coeficiente de rigidez elástica $[N/m]$

α coeficiente de rigidez $[N/m]$

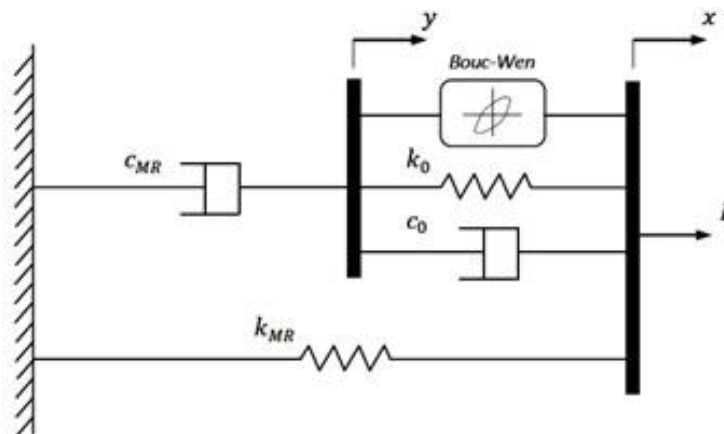
c_0 coeficiente de amortecimento viscoso $[Ns/m]$

e os coeficientes $\beta [m^{-2}]$, $\gamma [m^{-2}]$, n e A , dependem das características do amortecedor. Sendo n e A constantes.

4.1.1 Modelo de Bouc-Wen modificado para amortecedor MR

Foram feitas modificações neste modelo a fim de promover uma melhor precisão em sua aplicação. Sendo o modelo mais adequado para descrever o comportamento de dispositivos que apresentam uma rápida queda da força quando a velocidade do pistão passa por zero. O modelo de Bouc-Wen modificado pode ser visto na Figura 33 (SPENCER et al., 1997)

Figura 32 – Modelo Bouc-Wen modificado.



Fonte: Lai e Liao (2002).

As equações que regem o comportamento dinâmico do modelo Bouc-Wen modificado são descritas a seguir (LAI E LIAO, 2002):

$$c_{MR}\dot{y} = \alpha z + k_0(x - y) + c_0(\dot{x} - \dot{y}) \quad (34)$$

a variável z pode ser obtida de:

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}||z||z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (35)$$

Resolvendo em função de $\dot{y}$ obtêm-se:

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_{MR}} [\alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y)] \quad (36)$$

A resultante das forças gerada pelo sistema representado pela Figura 33 pode ser representada por:

$$F = \alpha z + k_0(x - y) + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_{MR}(x - x_0) \quad (37)$$

Acoplando a equação (34) com a equação (31), a força total também pode ser escrita como:

$$F = c_{MR}\dot{y} + k_{MR}(x - x_0) \quad (38)$$

Onde:

F força gerada pelo amortecedor magneto reológico

c_{MR} fator de amortecimento do amortecedor magneto reológico

K_{MR} rigidez associada ao amortecedor magneto reológico

$\dot{y}$ velocidade do embolo do pistão do amortecedor magneto reológico

x deslocamento do amortecedor magneto reológico

x_0 deslocamento inicial do amortecedor magneto reológico

k_0 coeficiente de rigidez inicial do conjunto

c_0 fator de amortecimento inicial

Como o modelo se comporta como um sistema passivo quando não há aplicação de corrente elétrica no AMR, temos então k_0 e c_0 inerentes ao conjunto.

O campo magnético aplicado influencia diretamente a tensão de cisalhamento do fluido MR. Assume-se que a variável α é uma função que depende de uma tensão elétrica aplicada à bobina do AMR. As demais equações que governam o modelo podem ser descritas a seguir (SPENCER et al., 1997):

$$\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (39)$$

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

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

Sendo a variável u obtida da seguinte forma:

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (40)$$

Onde v é a tensão elétrica aplicada ao dispositivo. Neste modelo, há um total de 14 parâmetros ($c_{0a}, c_{0b}, k_0, c_{MRa}, c_{MRb}, k_{MR}, x_0, \alpha_a, \alpha_b, \gamma, \rho, \beta, \eta, n$) para caracterizar o AMR. Os valores otimizados para os parâmetros são determinados através do ajuste do modelo de acordo com dados experimentais obtidos em testes laboratoriais (LAI e LIAO, 2002).

A força F gerada pelo AMR aplicada ao sistema da Figura 15 proporcionará uma eliminação das oscilações, e é abordado no próximo capítulo.

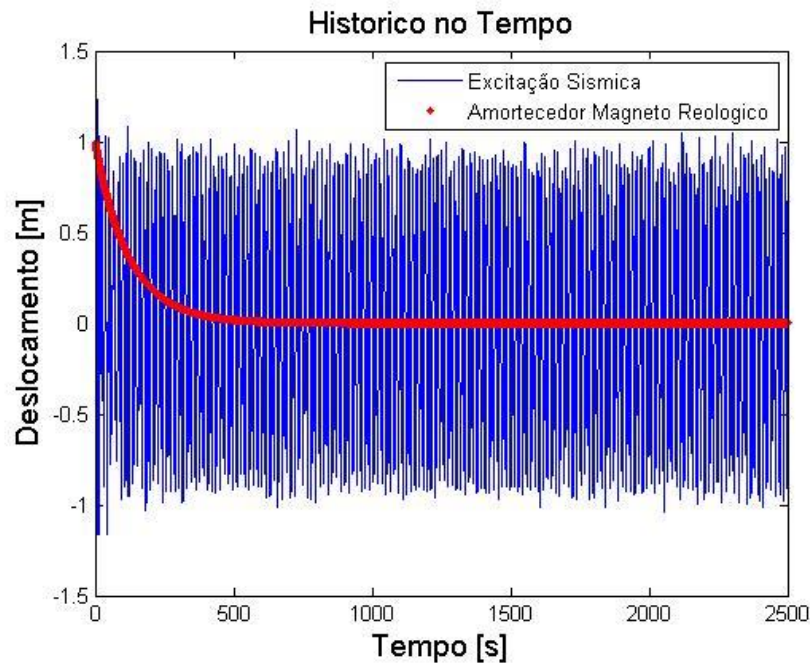
o objetivo é controlar a força do amortecedor utilizando uma corrente elétrica, utiliza-se uma aproximação da função (38). Segundo Tusset (2013) baseado em Dominguez et al (2006), que realizou estudos sobre o comportamento de amortecedores magneto-reológicos e através de dados experimentais, escreveu uma função que demonstra uma dependência explícita da corrente elétrica, a qual pode ser vista na função (42).

$$F = \frac{3,2}{(3e^{-3,4i}) + 1} \dot{x} + k_0 x + \frac{8,5}{(1,28e^{-3,9i}) + 1} z \quad (42)$$

Portanto esta função foi implementada em um algoritmo no software Octave e aplicada como se observou no conjunto de equações (41) e com grande eficácia ficou constatada a minimização das oscilações da estrutura, conforme apresentado nas Figuras 35 a 40.

Na Figura 35 tem-se, a nível de comparação, plotado o gráfico de deslocamento em função do tempo, tanto para estrutura sob excitação sísmica e periódica sem o controle aplicado (azul) e para estrutura quando se aplica o controle gerado pela equação 42 (vermelho). Controle este utilizando o sistema híbrido.

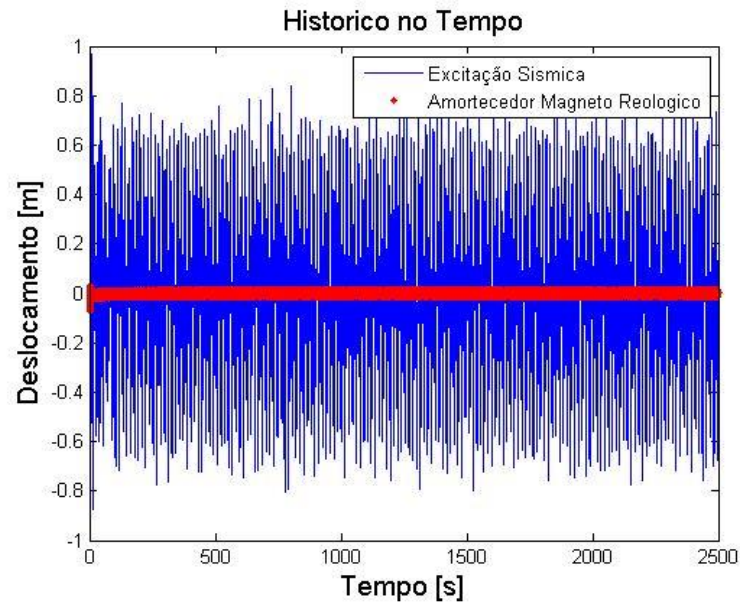
Figura 34 – Estrutura principal sob excitação sísmica e com controle híbrido.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 36 demonstra-se o deslocamento em função do tempo para o dispositivo AMS, observa-se que há também uma eliminação da oscilação quando associado o AMR.

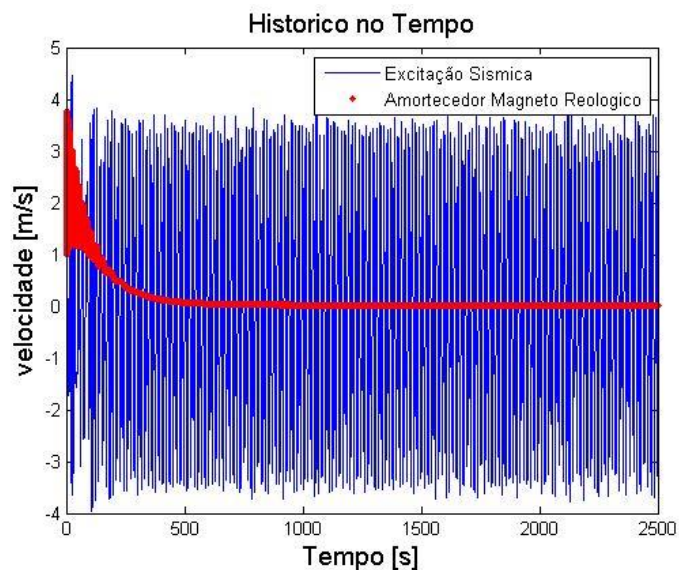
Figura 35 – AMS com o AMR acoplado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 37 demonstra a velocidade em função do tempo para a estrutura principal aplicado o controle (vermelho). Observa-se que em poucos ciclos de oscilações a energia é dissipada pelo controle híbrido e o sistema retorna ao seu ponto de equilíbrio.

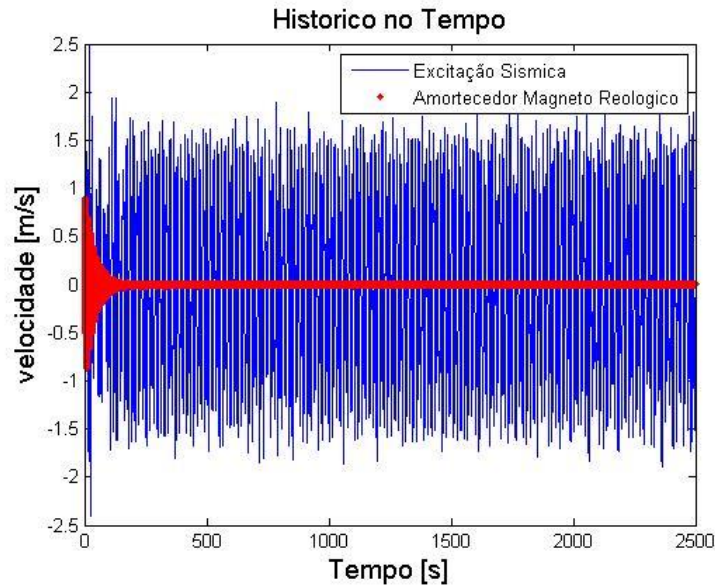
Figura 36 – Estrutura principal sob excitação sísmica e com controle híbrido.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 38 apresenta o gráfico plotado para o AMS quando acoplado o AMR (vermelho) que também minimiza as oscilações do mesmo.

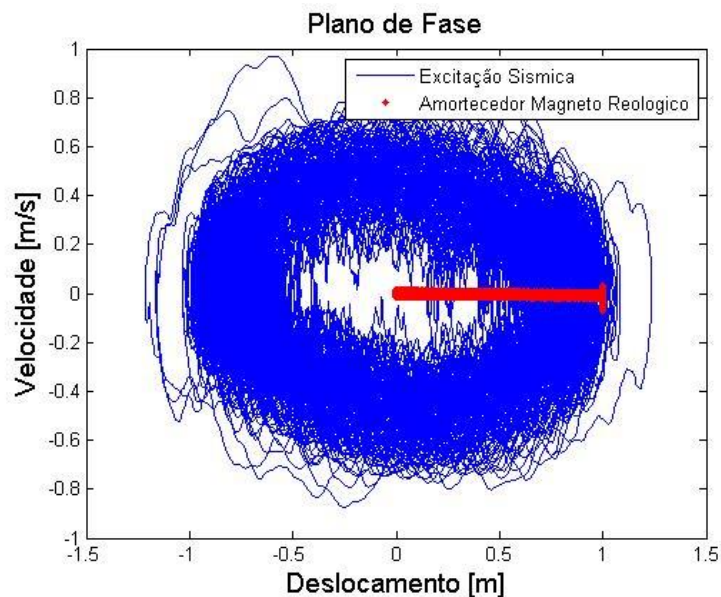
Figura 37 – AMS acoplado ao AMR.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 39 apresenta o plano de fase para a estrutura principal, que relaciona as variáveis velocidade e deslocamento, demonstrando o amortecimento acarretado pela implementação do sistema híbrido.

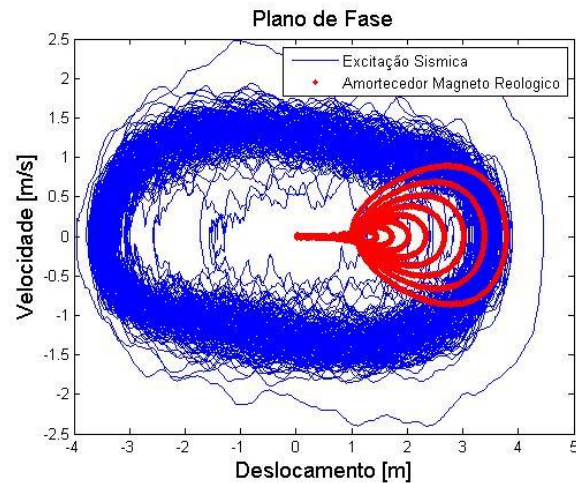
Figura 38 – Estrutura principal sob excitação sísmica e com controle híbrido.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 40 apresenta o gráfico plotado relacionando a velocidade e o deslocamento do AMS quando acoplado ao AMR. Demonstra-se assim a eficiência do controle híbrido aplicado a uma estrutura sob influência de uma excitação periódica, e concomitantemente, uma excitação sísmica, afim de reduzir e/ou eliminar as oscilações decorrentes destas excitações.

Figura 39 – AMS acoplado ao AMR.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho.

Os desastres ambientais ocasionados pelos abalos sísmicos afetam populações do mundo todo. Eles expõem grande quantidade de energia e às vezes ocasionam grandes tragédias, mesmo em cidades que dispõem de edifícios construídos baseados nas melhores normas internacionais de prevenções.

Como os terremotos são fenômenos naturais frequentes é necessário compreender seu comportamento. É possível medi-los, mas não impedi-los. Dessa forma é crucial desenvolver tecnologias que possam diminuir seus efeitos de atuação.

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. Foi proposto neste trabalho um 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.

O comportamento caótico promove desestabilidade estrutural que vem a causar perdas biológicas, materiais, danos ou ruína de construções humanas podendo levar a um grande número de vítimas e prejuízos econômicos.

Basicamente o controle estrutural se dá pela adição de dispositivos e/ou forças externas que promovem alterações nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura. Podem-se adotar vários modelos de controle, como o controle passivo, controle ativo, controle híbrido, e o controle semiativo. Foi proposta a aplicação da estratégia do amortecedor magneto reológico no modelo, sendo que esta estratégia híbrida minimizou as vibrações e reduziu o movimento oscilatório caótico do sistema a um ponto estável, conforme se observa nas Figuras de 35 a 40, onde se demonstra o comportamento caótico (em azul) e a eficácia da estratégia de controle (em vermelho) para este problema, sendo que tal objetivo foi alcançado através de simulações numéricas no software Octave.

Comprovou-se que a estratégia de controle híbrido adotado demonstra eficiência para este tipo de situação e pode ser utilizada como forma de auxiliar na atenuação de danos provocados por este tipo de desastre natural.

Como sugestões para trabalhos futuros, se propõe:

- melhorar o modelo proposto incluindo outras excitações
- propor outras técnicas de controle estrutural, como o controle linear ótimo, controle SDRE e LMI
- comparar o desempenho dos controladores
- confecção de protótipo do modelo proposto

REFERÊNCIAS

- DE LIMA, A. S. et al. Bancada experimental para avaliação de parâmetros de amortecedores magneto-reológicos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: CONEM, 2010. p. 1-9.
- DOMINGUEZ, A.; SEDAGHATI, R.; STIHARU, I. A new dynamic hysteresis model for magnetorheological dampers. **Smart materials and structures**, México, v. 15, n. 5, p. 1179, 2006.
- EL-KAFIFY, M.; EL-DEMERDASH, S. M.; RABEI, Al-Adl M.. Automotive ride comfort control using MR fluid damper. **Engineering**, Cairo, v. 4, n. 4, p. 179 - 2012.
- FRAHM, H. **A device for damping vibrations of bodies** US Patent 989958, 1909.
- FUJITA, T. **Semi-active seismic isolation system with controllable viscous damper using magneto-rheological fluid**. Japão; The university of Tokyo, 2006. Disponível em <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/cgi/teacher_kenkyuu.cgi?kenkyuu_id=534&eng=1>. Acessado em: 25 abr. 2016.
- HAYASHI, Y. et al. Tsunami source area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake determined from tsunami arrival times at offshore observation stations. **Earth, planets and space**, Japão, v. 63, n. 7, p. 809-813, 2011.
- KANAI, K. Semi-empirical formula for seismic characterisation of the ground. **Bull. Earthquake Res.** Tokyo, v. 35, n. 50, p. 327-345, June, 1957.
- LAI, C. Y.; LIAO, W. Vibration control of a suspension system via a magnetorheological fluid damper. **Journal of Vibration and Control**, Tokyo, v. 8, n. 4, p. 527-547, 2002.
- LIN, C.C., WANG, J.F., UENG, J.M.,. Vibration control identification of seismically excited MDOF structure-PTMD systems. **Journal of Sound and Vibration**, Tokyo, v. 240, p. 87–115, 2001.
- MASAKI, N. et al. Development and applications of tuned/hybrid mass dampers using multi-stage rubber bearings for vibration control of structures. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 13., 2004, Vancouver. **Anais...** Vancouver: WCEE, 2004. n. 2243, p. 1-15.
- MEYER, H.. Terremotos. In: TALLER REGIONAL DE CAPACITACIÓN PARA DESASTRES, 1, 1991, Bogotá. **Anais...** Bogotá: Terremotos, 1991. p. 1-20.
- MONTEIRO, L. H. A. **Sistemas dinâmicos**. São Paulo. Editora Livraria da Física, 2011. 670 p.
- RANA, R.; SOONG, T. T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. **Engineering structures**, New York, v. 20, n. 3, p. 193-204, 1998.
- RAO, S. **Vibrações mecânicas**. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2012. 424 p.

- ROFOOEI, F. R.; MOBARAKE, Aghababaii; AHMADI, G. Generation of artificial earthquake records with a nonstationary Kanai–Tajimi model. **Engineering Structures**, Iran, v. 23, n. 7, p. 827-837, 2001.
- SATO, E.; FUJITA, T. Study on application of controllable dampers using smart materials to full-scale base-isolated buildings. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 14., 2008, Beijing. **Anais...** Beijing: WCEE, 2008. p. 1-8
- SAVI, M. **Dinâmica não- linear e caos**. Rio de Janeiro: E-PAPERS, 2006. ISBN 9788576500629.
Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=ALKIjK9zz0oC>>. Acessado em: 10 abr 2016.
- SILVIA, S. **Desastres naturais: conceitos básicos**. São Paulo: São José dos Campos. 2010.
Disponível em: <http://www.inpe.br/crs/crectalc/pdf/silvia_saito.pdf>. Acessado em: 10 fev 2016.
- SKIDMORE, M.; TOYA, H. Do natural disasters promote long-run growth?. **Economic Inquiry**, Oregon, v. 40, n. 4, p. 664-687, 2002.
- SPENCER JUNIOR. 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**, Reino unido, v. 5, n. 5, p. 565, 1996.
- SPENCER, B. F. et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers. **Journal of engineering mechanics**, New York, v. 123, n. 3, p. 230-238, 1997.
- SYMANS, M. D. et al. Semi-active fluid viscous dampers for seismic response control. In: FIRST WORLD CONFERENCE ON STRUCTURAL CONTROL, 1., 1994, Los Angeles. **Anais...** Los Angeles: WCSC, 1994. p. 1-12.
- TRUONG, D. Q.; AHN, K. K. **MR fluid damper and its application to force sensorless damping control system**. Coréia. INTECH Open Access Publisher, 2012. 42 p.
- TUSSET, A. M.; BALTHAZAR, J. M. On the chaotic suppression of both ideal and non-ideal duffing based vibrating systems, using a magnetorheological damper. **Differential Equations and Dynamical Systems**, India, v. 21, n. 1-2, p. 105-121, 2013.
- UGALDE, A. **Terremotos: cuando la tierra tiembla**. Madrid: Editorial CSIC-CSIC Press, 2009. 197 p.
- VIGUIÉ, R.; KERSCHEN, G. Nonlinear vibration absorber coupled to a nonlinear primary system: a tuning methodology. **Journal of sound and Vibration**, Bélgica, v. 326, n. 3, p. 780-793, 2009.
- WANG, J.; LIN, C. Seismic performance of multiple tuned mass dampers for soil–irregular building interaction systems. **International journal of solids and structures**, Taiwan, v. 42, n. 20, p. 5536-5554, 2005.

WOLF, A.; SWIFT, J.B.; SWINNEY, H.L.; VASTANO, J.A. Determining lyapunov exponents from a time series. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Texas, v. 16, n. 3, p. 285–317, 1985.