



Eliot Pezo Zegarra

**Influência de um Amortecedor Magnetoreológico no
Isolamento de Base de Edifícios sob Ação Sísmica.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Paulo Batista Gonçalves

Rio de Janeiro, fevereiro de 2012



Eliot Pezo Zegarra

**Influência de um Amortecedor Magnetoreológico no
Isolamento de Base de Edifícios sob Ação Sísmica.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo assinada.

Paulo Batista Gonçalves

Orientador

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Carlos Magluta

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC - Rio

Rio de Janeiro, 10 de fevereiro de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Eliot Pezo Zegarra

Gradou-se em Engenharia Civil na “Universidad Nacional San Antonio Abad Del Cusco” no Peru, em novembro de 2006.

Ficha Catalográfica.

Pezo Zegarra, Eliot

Influência de um amortecedor magnetoreológico no isolamento de base de edifícios sob ação sísmica / Eliot Pezo Zegarra ; orientador: Paulo Batista Gonçalves. – 2012.
154 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.
Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Amortecedor magnetoreológico. 3. Modelo de Bouc-Wen. 4. Ação sísmica. 5. Redução de vibrações. I. Gonçalves, Paulo Batista. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

A Deus por permitir-me seguir este caminho, a meus pais Calixto e Matha ,a meus irmãos e irmãs, Ingrid, Mauro, Arturo, Magaly, e em especial para a mais nova Miluzca, que me ensina a lutar pela vida, e a todos meus sobrinhos, Jhoel, Rodrigo, Alejandra, Marcelo, Paula, Gustavo e ao sobrinho Gonzalo Fernando que está no caminho

Agradecimentos

Ao professor Paulo B. Gonçalves pelos ensinamentos no desenvolvimento da dissertação.

A Nathaly Sarasty e Maria Vanessa La Torre por sua amizade e ajuda e apoio durante tudo o tempo da maestria.

A Jackeline Castañeda, por sua amizade e seu apoio durante o desenvolvimento da dissertação.

A Elvis Mamáni, Javier Andres Forero, Diego Martinez, Luis Fernando Paullo, Gino Calderon pela amizade durante todo o tempo da mestria.

A meu amigo do Cusco Ivan Molina por seus conselhos, e todos meus amigos e colegas que direta e indiretamente ajudaram a fazer o trabalho.

A Universidade Pontifícia Católica do Rio de Janeiro e a todos os professores do departamento acadêmico de Engenharia Civil, pelos ensinamentos durante o tempo de formação acadêmica da maestria.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Zegarra, Eliot Pezo, Gonçalves, Paulo Batista. **Influência de um Amortecedor Magnetoreológico no Isolamento de Base de Edifícios sob Ação Sísmica**. Rio de Janeiro, 2012. 154p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A redução de deslocamentos e acelerações em edifícios é um aspecto de vital importância no projeto de estruturas sob a ação de sismos. Assim, o controle de vibrações de estruturas em regiões sujeitas a eventos sísmicos tem se tornado um importante tema de pesquisa em engenharia. Dentre os mecanismos propostos para a redução de vibrações em estruturas, encontram-se os amortecedores magnetoreológicos (MR). Amortecedores magnetoreológicos são dispositivos passivos ou semiativos que controlam as vibrações com um consumo mínimo de energia. Estes mecanismos são caracterizados por um comportamento histerético não linear que leva em geral a uma grande dissipação de energia. Neste trabalho estuda-se o efeito de um amortecedor MR e de seus parâmetros característicos na redução das vibrações de edifícios e torres esbeltas. Para isto, utiliza-se o modelo de Bouc-Wen. O edifício é descrito como um sistema discreto massa-mola-amortecedor do tipo *shear-building* e a torre como um pêndulo múltiplo, onde se leva em conta a possibilidade de grandes rotações e deslocamentos. Considera-se o amortecedor localizado na estrutura (primeiro andar) e como um sistema de isolamento de base, com o propósito de verificar a influência da localização do amortecedor na redução das respostas dinâmicas. Quando o dispositivo é usado como isolamento de base, ambos os modelos mostraram uma grande diminuição da resposta dinâmica, em comparação aos resultados com o dispositivo no primeiro andar. Estuda-se também a influência da relação entre as frequências da estrutura e o conteúdo de frequências da excitação na eficiência do amortecedor MR. Os resultados mostram que esta relação tem uma grande influência no grau de redução das vibrações da estrutura controlada. Em todos os casos analisados, observa-se que o amortecedor MR leva a uma redução das vibrações, em particular dos deslocamentos da estrutura.

Palavras-chave

Amortecedor magnetoreológico; modelo de Bouc-Wen; Ação sísmica; Redução de vibrações.

Abstract

Zegarra, P. Eliot; Gonçalves B., Paulo. **“Influence of a Magnetorheological Damper on Base Isolation of Buildings Under Seismic Excitation”**. Rio de Janeiro, 2012. 154p. Msc. Dissertation. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The reduction of displacements and accelerations in buildings is a vital aspect in the design of structures under an earthquake excitation. Thus, the vibration control of structures in areas subject to seismic events has become an important research topic in engineering. Among the proposed mechanisms to reduce vibrations in structures, are the magneto rheological dampers (MR). Magneto rheological dampers are passive or semi-active devices for vibration control characterized by small energy consumption. These mechanisms are characterized by a nonlinear hysteretic behavior that usually leads to large energy dissipation. In this paper the effect of an MR damper and its characteristic parameters in reducing the vibrations of buildings and slender towers is studied. For this, the Bouc-Wen model is adopted. The building is described as a discrete mass-spring-damper-type shear-building and the tower as a multiple pendulum, which takes into account large displacements and rotations. It is considered that the damper is located in the structure (first floor) or as a base isolation system, in order to verify the influence of the location of the damper in the reduction of dynamic responses. When the device is used as a base isolation, both models show a large decrease of the dynamic response as compared to the results with the device on the first floor. The influence of the relationship between the frequencies of the structure and frequency content of the excitation on the efficiency of MR damper is also investigated. The results show that this relation has a great influence on the degree of reduction of vibrations of the controlled structure. In all cases here analyzed, it is observed that the MR damper leads to a reduction of the vibration response, in particular the displacement of the structure.

Keywords: Magnetorheological damper; Bouc-Wen model; Seismic action; Vibration reduction.

Sumário

1 Introdução.	24
1.1. Considerações iniciais.	24
1.2. Objetivo e considerações do trabalho.	31
1.3. Estrutura da dissertação	31
2 amortecedor magnetoreológico.	33
2.1. Amortecedor magnetoreológico (MR)	33
2.1.1. Características físicas do amortecedor MR	33
2.2. Descrição geral do amortecedor de Bouc-Wen.	34
2.3. Formulação matemática do modelo Bouc Wen.	34
2.3.1. Modelo Bouc-Wen aplicado a um amortecedor MR	35
2.4. Análise numérica do modelo bouc-wen no amortecedor MR	40
3 Fundamentos teóricos.	43
3.1. Formulação matemática da estrutura do edifício tipo shear building	43
3.2. Formulação do problema estrutura – isolador de base.	43
3.2.1. Isolamento de base	46
3.2.2. Formulação matemática da estrutura – isolador.	46
3.3. Rigidez lateral do edifício.	48
3.3.1. Formulação matemática da rigidez lateral sem considerar o efeito da força axial.	48
3.3.2. Formulação matemática da rigidez lateral com a consideração da força axial.	50
3.4. Amortecimento.	53
3.4.1. Formulação matemática do amortecimento proporcional.	53
3.5. A modelagem de uma torre como pêndulo múltiplo.	55
3.5.1. Formulação matemática da estrutura - isolador.	56
3.5.2. Isolamento de base	62
3.5.3. Estrutura – isolador com amortecedor MR.	62

4 Sismos	65
4.1. Introdução.	65
4.2. Sismos naturais.	65
4.3. Geração de sismos artificiais.	76
4.3.1. Método da superposição de oscilações.	76
4.3.2. Correção da linha base.	79
5 Análise numérica de um edifício tipo <i>shear building</i>	80
5.1. Introdução	80
5.2. Características do edifício.	80
5.2.1. Estrutura sob uma excitação harmônica de base	82
5.2.2. Análise dinâmica da estrutura sob uma excitação sísmica real.	86
5.2.3. Análise dinâmica da estrutura com excitação de base com movimento sísmico artificial.	90
5.2.4. Análise dinâmica de um edifício mais flexível sob o sismo real	94
5.2.5. Análise da estrutura mais flexível sob o sismo artificial	97
5.3. Influência da variação dos parâmetros característicos do amortecedor MR na resposta da estrutura.	99
5.4. Influência do número de amortecedores mr na resposta da estrutura.	100
5.5. Análise dinâmica considerando o efeito p-delta	102
5.6. Análise dinâmica da estrutura com isolamento de base.	103
5.6.1. Características da estrutura	104
5.6.2. Modos e frequências naturais de vibração da estrutura.	106
5.7. Comparação de respostas da estrutura submetida a movimento de base sob ação sísmica.	107
5.7.1. Comparação de respostas do sistema com e sem amortecedor na base da estrutura.	107
5.7.2. Comparação da resposta do sistema para diferentes localizações do amortecedor MR.	110
5.8. Análise da resposta da estrutura a um movimento de base com o incremento do número de amortecedores MR.	112
5.9. Estudo paramétrico da variação da matriz de rigidez na resposta do	

edifício com isolamento de base sob ação sísmica.	115
5.10. Análise dinâmica da estrutura com isolamento de base sob ação sísmica do terremoto loma preta	121
5.11. Análise dinâmica da estrutura com maior flexibilidade com isolamento de base. sob ação sísmica do terremoto loma preta	124
6 Análise numérica de uma torre submetida a um movimento de base	129
6.1. Características do modelo	129
6.1.1. Frequências e modos de vibração da estrutura.	130
6.2. Análise dinâmica sob uma excitação de base harmônica	131
6.3. Superestrutura sob ação do sismo el centro.	133
6.4. Análise dinâmica da torre considerando a estrutura com maior flexibilidade.	135
6.5. Etrutura com isolamento de base.	138
6.5.1. Modos e frequências naturais de vibração da estrutura.	140
6.6. Respostas da estrutura com isolamento de base submetida sob ação sísmica.	141
6.6.1. Comparação de respostas da superestrutura com e sem isolador de base.	141
6.6.2. Comparação de respostas da superestrutura em relação a localização do amortecedor MR.	143
6.7. Influência do número de amortecedores Mr	146
7 Conclusões e sugestões	148
7.1. Sugestões para trabalhos futuros.	149
8 Refêrencias bibliográficas.	151

Lista de figuras

Figura 1.1 Camada deformável que leva à redução da frequência própria de vibração.	26
Figura 1.2 Diferença de respostas dos edifícios com e sem isolamento de base.	27
Figura 1.3 Intervalo usual das frequências de excitação das ações sísmicas com maior conteúdo energético, e faixa de frequências próprias da estruturas de base fixa e isolada.	27
Figura 1.4 Protótipo de um amortecedor MR de 20 toneladas.	29
Figura 1.5 Configuração experimental e instalação de amortecedor MR.	30
Figura 2.1 Representação simbólica do amortecedor com fluido MR segundo o modelo Bouc-Wen.	35
Figura 2.2 Parcelas presentes na formulação do amortecedor de Bouc-Wen.	36
Figura 2.3 Influência do parâmetro n no ciclo de histerese do amortecedor MR.	37
Figura 2.4 Efeito do parâmetro de rigidez K_0 no comportamento de histerese do amortecedor MR.	38
Figura 2.5 Efeito do parâmetro β no comportamento do amortecedor MR.	39
Figura 2.6 Variação da força (F) no amortecedor MR ao longo do tempo.	41
Figura 2.7 Força versus deslocamento	41
Figura 2.8 Força versus velocidade.	41
Figura 2.9 Decomposição das parcelas presentes no comportamento de histerese não linear no modelo de Bouc-Wen.	42
Figura 3.1- (A) Modelo de um vão para representar um edifício simples, (B) diagrama de corpo livre de cada laje.	44
Figura 3.2 -Modelo de massas concentradas e molas para representar um edifício simples e diagrama de corpo livre.	44
Figura 3.3 Modelo dinâmico do “ <i>shear building</i> ” com isolador de base.	46

Figura 3.4 Viga bi-engastada submetida a um deslocamento δ .	48
Figura 3.5 Diagramas de força cortante e momento fletor na viga.	49
Figura 3.6 Diagrama de corpo livre depois da perturbação δ , para a viga coluna.	50
Figura 3.7 Variação não linear da rigidez da viga-coluna em relação a α .	52
Figura 3.8 Variação de amortecimento crítico normalizado em relação a frequência natural.(Adotado de (Liu e Corman. 1995))	54
Figura 3.9 Modelagem da estrutura através de um sistema de pêndulos, com isolamento de base.	57
Figura 3.10 Representação do edifício na forma de torre com massas concentradas, com isolamento de base de comportamento não linear (amortecedor MR).	62
Figura 3.11 Viga em balanço submetido a um deslocamento lateral δ .	63
Figura 4.1 Epicentros de sismos na terra entre 1963 e 1998.	63
Figura 4.2 Movimento das placas tectônicas no planeta.	67
Figura 4.3 Tipos de falhas tectônicas.	67
Figura 4.4 Ondas geradas pela ação sísmica.	68
Figura 4.5 Registro típico de um sismo	68
Figura 4.6 Historia dos sismos no mundo.	71
Figura 4.7 Registro no tempo do sismo do Chile em 2010.	72
Figura 4.8 Registro no tempo do terremoto do Haiti em 2010.	73
Figura 4.9 Registro no tempo do terremoto do Japão.	74
Figura 4.10 Registro da componente horizontal do sismo do México em 1985 na estação SCT.	75
Figura 4.11 Registro da componente da aceleração horizontal do sismo do México em 1985, na estação da cidade universitária CU.	75
Figura 4.12 Acelerograma gerado a partir da FFT.	77
Figura 4.13 Função intensidade	78
Figura 5.1 Modelo de pórtico plano com amortecedor MR.(1996)	80
Figura 5.2 Frequências naturais e modos de vibração do edifício.	82
Figura 5.3 Variação da força no amortecedor MR no tempo para a excitação harmônica.	83

Figura 5.4 Variação no tempo do deslocamento absoluto do terceiro andar; excitação harmônica.	83
Figura 5.5 Variação no tempo do deslocamento relativo do primeiro andar; excitação harmônica.	84
Figura 5.6 Variação no tempo do aceleração do terceiro andar, excitação harmônica.	84
Figura 5.7 Ciclo de histerese do amortecedor MR; excitação harmônica.	85
Figura 5.8 Acelerograma do sismo “ <i>El Centro</i> ”.	86
Figura 5.9 Conteúdo de frequências do sismo “ <i>El Centro</i> ”, e da estrutura.	87
Figura 5.10 Força exercida pelo amortecedor MR para o sismo “ <i>El Centro</i> ”.	87
Figura 5.11 Deslocamento absoluto do terceiro andar no tempo para o sismo “ <i>El Centro</i> ”.	87
Figura 5.12 Deslocamento relativo do primeiro andar no tempo, sismo “ <i>El Centro</i> ”	88
Figura 5.13 Aceleração absoluta do terceiro andar, sismo “ <i>El Centro</i> ”.	88
Figura 5.14 Ciclo de histerese do amortecedor MR no tempo; sismo “ <i>El Centro</i> ”.	89
Figura 5.15 Acelerograma artificial.	90
Figura 5.16 Conteúdo de frequências do sismo artificial e da estrutura.	90
Figura 5.17 Força exercida pelo amortecedor MR no tempo, sismo artificial.	91
Figura 5.18 Deslocamento absoluto do terceiro andar, sismo artificial.	92
Figura 5.19 Deslocamento relativo do primeiro andar, sismo artificial.	92
Figura 5.20 Aceleração absoluta do terceiro andar, sismo artificial.	92
Figura 5.21 Ciclo de histerese do amortecedor MR; sismo artificial.	93
Figura 5.22 Conteúdo de Frequências do sismo “ <i>El Centro</i> ”, e da estrutura mais flexível.	95
Figura 5.23 Força exercida pelo amortecedor MR, sismo “ <i>El Centro</i> ”, estrutura mais flexível.	95
Figura 5.24 Deslocamento do terceiro andar, sismo “ <i>El Centro</i> ”, estrutura mais flexível.	95

Figura 5.25 Deslocamento relativo do primeiro andar, sismo “ <i>El Centro</i> ”, estrutura mais flexível.	96
Figura 5.26 Aceleração do terceiro andar, sismo “ <i>El Centro</i> ”, estrutura mais flexível.	96
Figura 5.27 Ciclo de histerese do amortecedor MR, sismo “ <i>El Centro</i> ”, estrutura mais flexível.	97
Figura 5.28 Conteúdo de Frequências do sismo artificial, e da estrutura mais flexível.	98
Figura 5.29 Variação dos parâmetros do amortecedor MR do modelo de Bouc-Wen.	99
Figura 5.30 Histerese do amortecedor MR pela variação dos parâmetros característicos.	100
Figura 5.31 Histerese do amortecedor MR pela variação dos parâmetros característicos.	100
Figura 5.32 Força do amortecedor MR com o número de amortecedores.	101
Figura 5.33 Deslocamento do terceiro andar com o número de amortecedores. MR	101
Figura 5.34 Deslocamento relativo do terceiro andar com o número de amortecedores MR.	101
Figura 5.35 Aceleração do terceiro andar com o número de amortecedores MR.	102
Figura 5.36 Variação do deslocamento máximo do terceiro andar da estrutura sob ação do sismo “ <i>El Centro</i> ” com incremento da força axial.	103
Figura 5.37 Variação das frequências naturais com a variação da força axial	103
Figura 5.38 Pórtico em análise com isolamento de base de tipo borracha e amortecedor MR.	104
Figura 5.39 Frequências e modos de vibração da estrutura-base isolada com amortecedor MR.	106
Figura 5.40 Conteúdo de frequências do sismo “ <i>El Centro</i> ” e da estrutura-base isolada com amortecedor MR.	106

Figura 5.41 Frequências e modos de vibração da estrutura-base isolada com amortecedor MR e apoios de borracha.	107
Figura 5.42 Conteúdo de frequências do sismo “ <i>El Centro</i> ”, e da estrutura-base isolada com amortecedor MR e bloco de elastômero (borracha).	107
Figura 5.43 Deslocamento absoluto do terceiro andar. Estrutura sob a ação do sismo “ <i>El Centro</i> ”, com e sem amortecedor MR na base.	108
Figura 5.44 Deslocamento relativo do primeiro andar. Estrutura sob a ação do sismo “ <i>El Centro</i> ”, com e sem amortecedor MR na base.	108
Figura 5.45 Aceleração absoluta do terceiro andar no tempo. Estrutura sob a ação do sismo “ <i>El Centro</i> ”, com e sem amortecedor MR na base.	109
Figura 5.46 Força no amortecedor MR.	110
Figura 5.47 Deslocamento absoluto do terceiro andar.	110
Figura 5.48 Deslocamento relativo do primeiro andar.	111
Figura 5.49 Aceleração absoluta do terceiro andar.	111
Figura 5.50 Ciclo de histerese do amortecedor MR.	112
Figura 5.51 Deslocamento da fundação, com o número de amortecedores MR na fundação.	113
Figura 5.52 Variação da força do amortecedor MR com o número de amortecedores.	113
Figura 5.53 Variação do deslocamento do terceiro andar com o número de amortecedores.	113
Figura 5.54 Variação do deslocamento relativo do primeiro andar com o número de amortecedores.	114
Figura 5.55 Variação da Aceleração do terceiro andar com o número de amortecedores.	114
Figura 5.56 Deslocamento relativo do primeiro andar no tempo com acréscimo de número de amortecedores na fundação.	115
Figura 5.57 Variação das frequências naturais do sistema estrutura-base isolada com o parâmetro α .	116
Figura 5.58 Variação dos deslocamentos absolutos máximos sem e com	

amortecedor MR na fundação em função do parâmetro α .	116
Figura 5.59 Deslocamento relativo de cada andar da estrutura com e sem amortecedor MR na fundação em função do parâmetro α .	117
Figura 5.60 Variação dos deslocamentos relativos com o amortecedor MR na fundação em função do parâmetro α .	118
Figura 5.61 Variação da aceleração absoluta do edifícios com e sem amortecedor MR na fundação em função do parâmetro α .	118
Figura 5.62 Acelerograma do sismo “ <i>Loma Preta</i> ”.	121
Figura 5.63 Conteúdo de Frequências do sismo “ <i>Loma Preta</i> ” e da estrutura ($\alpha=1$)	122
Figura 5.64 Força exercida pelo amortecedor MR. Sismo “ <i>Loma Preta</i> ”	123
Figura 5.65 Deslocamento absoluto do terceiro andar. Estrutura sob ação do sismo “ <i>Loma Preta</i> ”; com e sem amortecedor MR na base.	123
Figura 5.66 Deslocamento relativo do primeiro andar. Estrutura sob ação do sismo “ <i>Loma Preta</i> ”, com e sem amortecedor MR na base.	123
Figura 5.67 Variação da aceleração absoluta do terceiro andar. Estrutura sob a ação do sismo “ <i>Loma Preta</i> ”, com e sem amortecedor MR na base.	124
Figura 5.68 Ciclo de histerese do amortecedor MR; sismo “ <i>Loma Preta</i> ”	124
Figura 5.69 Conteúdo de Frequências do sismo “ <i>Loma Preta</i> ”, e da estrutura ($\alpha=0.05$).	126
Figura 5.70 Força exercida pelo amortecedor MR. Sismo “ <i>Loma Preta</i> ”	126
Figura 5.71 Deslocamento absoluto do terceiro andar. Estrutura sob ação do sismo “ <i>Loma Preta</i> ”; com e sem amortecedor MR na base.	126
Figura 5.72 Deslocamento relativo do primeiro andar. Estrutura sob ação do sismo “ <i>Loma Preta</i> ”, com e sem amortecedor MR na base.	127
Figura 5.73 Aceleração absoluta do terceiro andar no tempo. Estrutura sob a ação do sismo “ <i>Loma Preta</i> ”, com e sem amortecedor MR na base.	127
Figura 5.74 Ciclo de histerese do amortecedor MR; sismo “ <i>Loma Preta</i> ” <i>estrutura mais flexível</i>	127

Figura 6.1 Superestrutura de uma torre modelada como um pêndulo múltiplo. Dados físicos e geométricos.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6.2 Frequências naturais e modos de vibração da estrutura.	130
Figura 6.3 Quantificação do deslocamento horizontal x_i em função do giro $\theta_i(t)$.	131
Figura 6.4 Variação no tempo da força no amortecedor MR para a excitação harmônica.	132
Figura 6.5 Variação no tempo do deslocamento absoluto do terceiro andar. Estrutura sob uma excitação harmônica.	132
Figura 6.6 Variação no tempo da aceleração absoluta do terceiro andar. Estrutura sob uma excitação harmônica.	132
Figura 6.7 Ciclo de histerese do amortecedor MR; excitação harmônica.	133
Figura 6.8 Conteúdo de Frequências do sismo El Centro, e da estrutura.	134
Figura 6.9 Deslocamento absoluto do terceiro andar, no tempo, sob ação do sismo El centro.	134
Figura 6.10 Aceleração do terceiro andar no tempo, sob ação do sismo El centro.	135
Figura 6.11 Conteúdo de Frequências do sismo El Centro e da estrutura mais flexível.	136
Figura 6.12 Variação do deslocamento absoluto do terceiro andar.	136
Figura 6.13 Variação da aceleração do terceiro andar .	137
Figura 6.14 Ciclo de histerese do amortecedor MR; excitação sísmica El Centro, estrutura mais flexível.	137
Figura 6.15 Superestrutura-base isolada com sistema de isolamento com elastômero e amortecedor MR.	138
Figura 6.16 Modos de vibração da superestrutura-base isolada com amortecedor MR.	140
Figura 6.17 Conteúdo de frequências do sismo El Centro e da estrutura-base isolada com amortecedor MR.	140
Figura 6.18 Modos de vibração da superestrutura-base isolada com amortecedor MR e borracha.	141

Figura 6.19 Conteúdo de Freqüências do sismo El Centro e da estrutura-base isolada com amortecedor MR e bloco de elastômero (borracha).	141
Figura 6.20 Deslocamento absoluto do terceiro andar no tempo, sob ação do sismo El Centro, com e sem amortecedor MR na fundação.	142
Figura 6.21 Aceleração absoluta do terceiro andar no tempo, sob ação do sismo El Centro, com e sem amortecedor MR na fundação.	142
Figura 6.22 Força no amortecedor MR, no tempo sob ação do sismo El Centro, da estrutura-base isolada com amortecedor MR.	144
Figura 6.23 Força no amortecedor MR, no tempo sob ação do sismo El Centro, da estrutura com amortecedor na primeira massa.	144
Figura 6.24 Deslocamento absoluto do terceiro andar, no tempo, sob ação do sismo El Centro, em relação à sua localização do amortecedor MR.	144
Figura 6.25 Aceleração absoluta da terceira massa, no tempo, sob ação do sismo El Centro, em relação à localização do amortecedor MR.	145
Figura 6.26 Ciclo de histerese do amortecedor MR no tempo; excitação sísmica El Centro, da estrutura mais flexível.	145
Figura 6.27 Deslocamento da fundação com o número de amortecedores MR.	146
Figura 6.28 Força do amortecedor MR com o número de amortecedores.	146
Figura 6.29 Deslocamento do terceiro andar com o número de amortecedores MR.	145
Figura 6.30 Aceleração do terceiro andar com o número de amortecedores MR.	147

Lista de tabelas

Tabela 4.1 Magnitude na escala de Richter e efeitos sentidos.	70
Tabela 4.2 Valores na escala Richter de terremotos relevantes. . (Center for engineering strong motiom data. Acessada em 7/01/2012).	71
Tabela 5.1 Tabela comparativa das respostas máximas devidas à excitação harmônica.	84
Tabela 5.2 Tabela comparativa das forças cortantes e momentos máximos nas colunas do edifício devidas à excitação harmônica.	85
Tabela 5.3 Tabela comparativa das respostas máximas da estrutura com e sem amortecedor MR, para o sismo “ <i>El Centro</i> ”.	89
Tabela 5.4 Tabela comparativa de forças cortantes e momentos nas colunas do edifício devido ao sismo “ <i>El Centro</i> ”.	89
Tabela 5.5 Tabela comparativa das respostas máximas. Estrutura sob sismo artificial.	92
Tabela 5.6 Tabela comparativa de forças cortantes e momentos máximos nas colunas do edifício.	93
Tabela 5.7 Tabela comparativa das respostas máximas, para a estrutura mais flexível sujeita ao sismo “ <i>El Centro</i> ”.	96
Tabela 5.8 Tabela comparativa de forças cortantes e momentos nas colunas do edifício simples, devido ao “ <i>El Centro</i> ”. Estrutura mais flexível.	97
Tabela 5.9 Tabela comparativa das respostas máximas para a estrutura mais flexível (sismo artificial).	98
Tabela 5.10 Tabela comparativa de forças cortantes e momento, nas colunas do edifício simples, devido a movimento sísmico “ <i>El Centro</i> ”, da estrutura mais flexível.	98
Tabela 5.11 Respostas máximas da estrutura.	109
Tabela 5.12 Comparação de forças cortantes e momentos fletores máximos nas colunas.	109
Tabela 5.13 Quadro comparativo de respostas máximas da estrutura em função da localização do amortecedor MR.	111

Tabela 5.14 Comparação das forças cortantes e momentos fletores nas colunas em função da localização do amortecedor MR. Sismo “ <i>El Centro</i> ”.	112
Tabela 5.15 Deslocamentos máximos em função de α .	119
Tabela 5.16 Acelerações máximas em função de α .	120
Tabela 5.17 Quadro comparativo de respostas máximas.	125
Tabela 5.20 Tabela comparativa de forças cortantes e momentos fletores máximos nas colunas.	128
Tabela 6.1 Tabela comparativa das respostas máximas. Excitação harmônica.	132
Tabela 6.2 Tabela comparativa das respostas máximas, sob ação do sismo El centro.	135
Tabela 6.2 Tabela comparativa das respostas máximas, sob ação do sismo El centro.	135
Tabela 6.3 Comparação das respostas máximas. Estrutura mais flexível sob ação do sismo El Centro.	137
Tabela 6.4 Quadro comparativo de respostas máximas da superestrutura com e sem amortecedor MR na fundação.	143
Tabela 6.5 Quadro comparativo de respostas máximas da superestrutura em função da localização do amortecedor MR.	145

Símbolos

A	fator de escala (parâmetro do amortecedor MR, modelo de Bouc-Wen).
c	coeficiente de amortecimento viscoso linear do sistema.
c_{cr}	coeficiente de amortecimento crítico.
C_b	coeficiente de amortecimento do isolador de base linear (borracha).
$[C]$	matriz de amortecimento.
C_i	coeficiente de amortecimento do i -ésimo andar.
$[C_E]$	matriz de amortecimento equivalente do sistema estrutura-isolador.
c_o	coeficiente de amortecimento viscoso do amortecedor MR
E	módulo de elasticidade do material.
F	força total do amortecedor de Bouc Wen.
F_a	força de amortecimento viscoso.
FL	função de Lagrange.
$F(t)$	força de restauração.
$f(t)$	força de excitação.
$\{f(t)\}$	vetor de forças de excitação.
F_z, F_{z0}	força restauradora evolutiva do amortecedor MR.
I	momento de inércia.
k, k_i	rigidez elástica.
K_i	Rigidez elástica do i -ésimo andar.
k_f	rigidez plástica.
k_o	coeficiente de rigidez do amortecedor MR
k_b	coeficiente de rigidez do isolador de base (borracha).
K_r	rigidez rotacional da viga ou coluna.
$[K]$	matriz de rigidez.
$[K_E]$	matriz de rigidez equivalente do sistema
L	Comprimento da viga ou coluna
m	massa do sistema.
m_b	massa da fundação.
m_i	massa do i -ésimo andar.
M	momento fletor da coluna ou viga.
$[M]$	matriz de massa.
$[M_E]$	matriz equivalente de massa do sistema estrutura-isolador.

$[M'_E]$	matriz equivalente de massa que gera as forças inerciais do sistema estrutura-isolador.
n	fator que regula a suavidade de transição entre a região linear e não linear (parâmetro do amortecedor MR, modelo de Bouc-Wen).
P	Força axial.
P_{CR}	carga crítica de Euler
$S, S(t)$	deslocamento do solo.
$\ddot{S}, \ddot{S}(t)$	aceleração do solo.
$R_b; R_i$	função de Rayleigh para as forças dissipativas.
T	energia cinética.
U	energia interna de deformação
u	deslocamento da massa da fundação.
\dot{u}	velocidade da massa da fundação.
\ddot{u}	aceleração da massa da fundação.
V	força cortante na coluna ou viga
X_n, x	deslocamento da massa (do andar).
$\{x\}$	vetor de deslocamentos.
\dot{x}	velocidade da massa (do andar).
$\{\dot{x}\}$	vetor de velocidades.
\dot{x}_{z0}	velocidade no ponto onde a força restauradora é nula.
\ddot{x}	aceleração da massa (do andar)
$\{\ddot{x}\}$	vetor de acelerações.
W	trabalho total.
ω	deslocamento de uma viga.
ω_n	frequências naturais da estrutura
$z, z(t)$	variável evolutiva associado ao ciclo de histerese do amortecedor MR.
β	parâmetro do amortecedor MR, modelo de Bouc-Wen.
γ	parâmetro do amortecedor MR, modelo de Bouc-Wen.
α	parâmetro do amortecedor MR, modelo de Bouc-Wen.
$\{\Gamma\}$	vetor posição da força de excitação.
$\{\Lambda\}$	vetor de posição do amortecedor Bouc-Wen.
δ	deslocamento máximo no extremo livre da coluna ou viga.
ξ	fator de amortecimento
Π_p	energia potencial.

θ_i	rotação do enésimo andar.
$\dot{\theta}_i$	velocidade angular do enésimo andar.
$\ddot{\theta}_i$	aceleração angular do enésimo andar.