

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO SIMULTÂNEA DE POSIÇÕES E FORÇAS DE AMORTECEDORES DE
VIBRAÇÃO POR ATRITO PARA CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS

por

Sergio Pastor Ontiveros Pérez

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Fevereiro de 2014.

OTIMIZAÇÃO SIMULTÂNEA DE POSIÇÕES E FORÇAS DE AMORTECEDORES
DE VIBRAÇÃO POR ATRITO PARA CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE
ESTRUTURAS

por

Sergio Pastor Ontiveros Pérez
Engenheiro Mecatrônico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Leticia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Roberto Domingo Rios, PPGEC/UFRGS

Prof. Dr. Eduardo André Perondi, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Rogério José Marczak
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 26 de fevereiro de 2014.

Aos meus pais e a minha irmã que no céu está.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos que contribuíram na elaboração deste trabalho.

A minha orientadora, prof. Letícia Fleck Fadel Miguel, pelo apoio, dedicação e paciência e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores e funcionários da Escola de Engenharia e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, pelo apoio e os ensinamentos ao longo destes dois anos.

A todo o pessoal e bolsistas do Gmap, em especial aos meus colegas de baia e aos meus colegas de aula Eduardo Padoin, Odair Menuzzi, Rafael Crespo, Eduardo Scariot, Ana Formenton, Adelano Esposito, Marcelo Tosso, Marcos Daniel, Daniel de Leon e outras pessoas que me deram o seu apoio.

A minha família, que desde a minha linda Colômbia, me deram o seu apoio, incentivo e carinho.

E em especial a minha namorada, a Mestranda Alejandra Flórez Velásquez, por estar ao meu lado, dando apoio, carinho e compreensão.

Finalmente a CAPES, pelo apoio financeiro a este trabalho.

RESUMO

A otimização de amortecedores é uma área nova que vem sendo explorada nos últimos anos. Existem vários métodos clássicos e outros mais recentes que estão disputando em confiabilidade, eficiência e rapidez na obtenção de um resultado ótimo. Os algoritmos de otimização são classificados em determinísticos, que utilizam a informação do gradiente, ou seja, usam os valores das funções e suas derivadas, e os meta-heurísticos são algoritmos aleatórios que são métodos probabilísticos não baseados em gradiente, utilizando somente a avaliação da função objetivo.

O *Firefly Algorithm* é um algoritmo meta-heurístico relativamente recente inspirado no comportamento da luz dos vaga-lumes. Este trabalho propõe um método para a otimização de amortecedores por atrito utilizando algoritmo meta-heurístico. O método proposto é testado em dois edifícios, de nove e dezesseis andares, submetidos a duas excitações sísmicas cada.

A otimização tem um objetivo principal: diminuir a resposta dinâmica em termos do deslocamento máximo no topo das estruturas obtido através de um algoritmo programado baseado no método das diferenças finitas centrais, otimizando o local de um número máximo de amortecedores e as forças de atrito dos mesmos. Para o caso da estrutura de nove andares o número máximo de amortecedores é de quatro e para o caso da estrutura de dezesseis andares o número máximo é seis.

Os resultados demonstraram que, para os dois casos estudados, o deslocamento no topo da estrutura diminuiu em mais de 50%, concluindo-se que o método programado é eficaz assim como o *Firefly Algorithm* é adequado para obter as posições e as forças de atrito ótimas. Portanto, acredita-se que o método proposto poderá ser utilizado como uma ferramenta útil para auxiliar no projeto de amortecedores por atrito.

Palavras-chave: Otimização de amortecedores passivos, amortecedor por atrito, controle de vibrações, excitação sísmica, *Firefly Algorithm*.

ABSTRACT

The damper's optimization is a new area that has been explored in recent years. There are several classics and newer methods that are competing in reliability, efficiency and speed in achieving a great result. The algorithms are classified as deterministic, using gradient information, or use the function values and their derivatives, and meta- heuristic optimization algorithms are random probabilistic methods that are not based on gradient using only the evaluation of the objective function.

The Firefly Algorithm is a relatively new meta-heuristic algorithm inspired on the behavior of the light of fireflies. This work proposes a method for the friction damper's optimization using meta-heuristic algorithm. The proposed method is tested in two structures: a nine story building and a sixteen story building. They were submitted to two seismic excitations each.

The optimization has one main goal: to reduce the dynamic response in terms of the maximum displacement at the top of the structures obtained by a programmed algorithm based on the central finite difference method, optimizing the location of a maximum number of dampers and their friction's forces. In the case of the nine story building, the maximum number of dampers is four, and in the case of the sixteen story building the maximum number is six.

The results showed that for the two cases studied, the displacement at the top of the structure decreases by more than 50%, concluding that the programmed method is effective and the Firefly Algorithm is appropriate to get the positions and friction's forces optimal. Therefore, it is believed that the proposed method can be used as a tool to aid in the design of friction dampers.

Keywords: Optimization of passive dampers, friction damper, vibration control, seismic excitation, Firefly Algorithm.

ÍNDICE

RESUMO.....	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Organização do trabalho	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Conceitos básicos de otimização	5
2.1.1 Variáveis de projeto.....	5
2.1.2 Função objetivo	5
2.1.3 Restrições	6
2.2 Algoritmos meta-heurísticos.....	7
2.3 Amortecimento	8
2.4 Dispositivos de dissipação de energia	10
2.4.1 Amortecedor viscoso ou visco-elástico	10
2.4.2 Amortecedor de Coulomb ou por atrito seco.....	11
2.4.3 Amortecedor metálico	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Sistemas de controle passivos de vibrações.....	13
3.1.1 Tipos de amortecedores	14
3.2 Desempenho sísmico dos amortecedores por atrito.....	17
3.3 Otimização do projeto de amortecedores.....	25
4. FIREFLY ALGORITHM (ALGORITMO DE VAGA-LUME)	29
5. ESQUEMAS COMPUTACIONAIS PARA SISTEMAS COM ATRITO SECO	34
5.1 Modelo de amortecimento viscoso equivalente para atrito de Coulomb.....	34
5.1.1 Solução analítica.....	34
5.1.2 Análise de energia	36

5.1.3	Amortecimento viscoso equivalente para excitação periódica.....	36
5.1.4	Amortecimento equivalente instantâneo para excitação não-periódica ...	38
5.2	Representação do atrito de Coulomb por funções contínuas	41
5.2.1	Análise	42
5.2.2	Verificação.....	45
6	APLICAÇÕES PRÁTICAS	47
6.1	Resposta dinâmica de estruturas pelo método das Diferenças Finitas.....	47
6.2	Resposta dinâmica de estruturas com amortecedores por atrito	49
6.3	Validação do programa elaborado	50
6.4	Estruturas analisadas	56
6.5	Otimização dos amortecedores das estruturas	60
6.5.1	Edifício de nove pavimentos	61
6.5.2	Edifício de dezesseis pavimentos	72
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	85
7.1	Conclusões finais	85
7.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	APÊNDICE A - Resultados das simulações para o prédio de nove andares com o sismo de Cauçete	93
A.1	Simulações com 1000 iterações	93
A.2	Simulações com 5000 iterações	96
A.3	Comparação do deslocamento com os amortecedores em locais diferentes aos ótimos no Edifício de 9 andares submetido ao sismo Cauçete	99
	APÊNDICE B - Resultados das simulações para o prédio de nove andares com o sismo El Centro	100
B.1	Simulações com 1000 iterações	100
B.2	Simulações com 5000 iterações	103
B.3	Comparação do deslocamento com os amortecedores em locais diferentes aos ótimos no Edifício de 9 andares submetido ao sismo El Centro	106
	APÊNDICE C - Resultados das simulações para o prédio de dezesseis andares com o sismo de Cauçete	108
C.1	Simulações com 1000 iterações	108
C.2	Simulações com 5000 iterações	111
C.3	Comparação do deslocamento com os amortecedores em locais diferentes aos ótimos no Edifício de 16 andares submetido ao sismo Cauçete	114

APÊNDICE D - Resultados das simulações para o prédio de dezesseis andares com o sismo El Centro	116
D.1 Simulações com 1000 iterações	116
D.2 Simulações com 5000 iterações	119
D.3 Comparação do deslocamento com os amortecedores em locais diferentes aos ótimos no Edifício de 16 andares submetido ao sismo El Centro	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - a) Amortecedor Visco-elástico por cisalhamento b) amortecedor visco-elástico com configuração de suporte diagonal. Fonte: (Rai, Reddy, Ramanujam, Venkatraj, & Agrawal, 2009).	11
Figura 2.2 - Dispositivo Slotted Bolted Connection SBC. Fonte: (Chopra, 2002)	12
Figura 2.3 - Dispositivo TADAS. Fonte: (Chopra, 2002).....	12
Figura 3.1 - Edifícios equipados com dissipadores de energia externos. Fonte: (De la Cruz <i>et al.</i> , 2007).....	15
Figura 3.2 - Amortecedores por atrito a) Suporte em X b) Suporte Chevron. Fonte: Cheung <i>et al.</i> , 2000.....	19
Figura 3.3 - Instalação experimental do modelo da estrutura dimensionada com dispositivos amortecedores por atrito. Fonte: Mualla e Belev, 2002.	21
Figura 3.4 - Fotos da estrutura submetida à testes com amortecedor por atrito. Fonte: Liao <i>et al.</i> , 2004.....	21
Figura 3.5 - Resposta vs. deslizamento. Fonte: Pall e Pall, 2004.....	23
Figura 3.6 - Comparação do deslocamento nos andares. Fonte: Adaptada de Chang <i>et al.</i> , 2006.....	24
Figura 3.7 - Deslocamento máximo no topo da estrutura, a) estrutura de 10 andares, b) estrutura de 5 andares. Fonte: Vaseghi <i>et al.</i> , 2009.....	25
Figura 4.1 - Pseudocódigo do <i>Firefly Algorithm</i> . Fonte: Adaptada de (Yang, 2010). ...	30
Figura 5.1 - Sistema de dois graus de liberdade com atrito. Fonte: Adaptada de Tan e Rogers, 1995.....	35
Figura 5.2 - Sistema anterior com amortecimento viscoso equivalente. Fonte: Adaptada de Tan e Rogers, 1995	39
Figura 5.3 - Representação Esquemática do Sistema Considerado. Fonte: Adaptada de Mostaghel e Davis, 1997	42
Figura 5.4 - Comparação das Quatro Representações para a Função Sinal. Fonte: Adaptada de Mostaghel e Davis, 1997.	43
Figura 5.5 - Representação da função sinal por f_1 . Fonte: Adaptada de Mostaghel e Davis, 1997.....	44
Figura 6.1 - Localização dos amortecedores	49
Figura 6.2 - Sistema de 1 GDL em vibrações livres com atrito seco	51
Figura 6.3 - Comparação da resposta do método analítico com o método numérico.....	53

Figura 6.4 - Comparação das respostas no quinto ciclo	54
Figura 6.5 - Sistema de 3 GDL em vibrações livres com atrito seco	54
Figura 6.6 - Comparação da resposta do método analítico com o método numérico do sistema de três graus de liberdade.	55
Figura 6.7 - Edifício de nove pavimentos.....	56
Figura 6.8 - Edifício de dezesseis pavimentos	56
Figura 6.9 - Os Pórticos Discretizados. a) Estrutura de nove pavimentos. b) Estrutura de dezesseis pavimentos.....	57
Figura 6.10 - O Sismo de Cauçete.....	59
Figura 6.11 - O Sismo El Centro	60
Figura 6.12 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	62
Figura 6.13 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	63
Figura 6.14 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	65
Figura 6.15 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	65
Figura 6.16 - Curva de convergência para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete	67
Figura 6.17 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações	68
Figura 6.18 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações	68
Figura 6.19 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações	70
Figura 6.20 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações	70
Figura 6.21 - Curva de convergência para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro	72
Figura 6.22 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	74
Figura 6.23 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	74

Figura 6.24 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	76
Figura 6.25 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	77
Figura 6.26 - Curva de convergência para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete	78
Figura 6.27 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações	80
Figura 6.28 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações	80
Figura 6.29 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações	82
Figura 6.30 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações	83
Figura 6.31 - Curva de convergência para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro	84
Figura A.1 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	94
Figura A.2 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	95
Figura A.3 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	96
Figura A.4 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	97
Figura A.5 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	98
Figura A.6 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	99
Figura A.7 - Comparação dos deslocamentos do Edifício de 9 andares submetido ao sismo Cauçete com os amortecedores nos locais ótimos e em locais qualquer.	100
Figura B.1 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações.....	101
Figura B.2 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações.....	102

Figura B.3 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações.....	103
Figura B.4 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações.....	104
Figura B.5 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações.....	105
Figura B.6 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações.....	106
Figura B.7 - Comparação dos deslocamentos do Edifício de 9 andares submetido ao sismo El Centro com os amortecedores nos locais ótimos e em locais qualquer.....	107
Figura C.1 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	109
Figura C.2 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	110
Figura C.3 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	111
Figura C.4 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	112
Figura C.5 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	113
Figura C.6 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	114
Figura C.7 - Comparação dos deslocamentos do Edifício de 16 andares submetido ao sismo Cauçete com os amortecedores nos locais ótimos e em locais qualquer.	115
Figura D.1 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações.....	117
Figura D.2 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações.....	118
Figura D.3 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações.....	119
Figura D.4 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações.....	120
Figura D.5 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações.....	121

Figura D.6 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações.....	122
Figura D.7 - Comparação dos deslocamentos do Edifício de 16 andares submetido ao sismo Cauçete com os amortecedores nos locais ótimos e em locais qualquer.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Comparação das Representações com a Solução de Den Hartog	45
Tabela 6.1 - Propriedades do sistema de 3 GDL	55
Tabela 6.2 - Propriedades da estrutura de nove pavimentos	57
Tabela 6.3 - Propriedades da estrutura de dezesseis pavimentos	58
Tabela 6.4 - Frequências naturais do edifício de 9 pavimentos.....	58
Tabela 6.5 - Frequências naturais do edifício de 16 pavimentos.....	59
Tabela 6.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	62
Tabela 6.7 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	63
Tabela 6.8 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	64
Tabela 6.9 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	66
Tabela 6.10 - Resultados estatísticos para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete, para 4 simulações independentes.....	66
Tabela 6.11 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações.....	67
Tabela 6.12 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações	69
Tabela 6.13 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações.....	69
Tabela 6.14 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações	71
Tabela 6.15 - Resultados estatísticos para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro, para 4 simulações independentes.....	71
Tabela 6.16 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações.....	73
Tabela 6.17 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações	75
Tabela 6.18 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações.....	76

Tabela 6.19 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações	77
Tabela 6.20 - Resultados estatísticos para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete, para 4 simulações independentes.....	78
Tabela 6.21 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações	79
Tabela 6.22 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações	81
Tabela 6.23 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações	82
Tabela 6.24 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações	83
Tabela 6.25 - Resultados estatísticos para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro, para 4 simulações independentes	84
Tabela A.1 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 2	93
Tabela A.2 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 3	94
Tabela A.3 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 4	95
Tabela A.4 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 2	96
Tabela A.5 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 3	97
Tabela A.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 4	98
Tabela A.7 - Forças otimizadas e posições dos amortecedores de atrito	99
Tabela B.1 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 2.....	101
Tabela B.2 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 3.....	102
Tabela B.3 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 4.....	103

Tabela B.4 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 2.....	104
Tabela B.5 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 3.....	105
Tabela B.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 4.....	106
Tabela B.7 - Forças otimizadas e posições dos amortecedores de atrito.....	106
Tabela C.1 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 2	108
Tabela C.2 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 3	109
Tabela C.3 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 4	110
Tabela C.4 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 2	111
Tabela C.5 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 3	112
Tabela C.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 4	113
Tabela C.7 - Forças otimizadas e posições dos amortecedores de atrito.....	114
Tabela D.1 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 2.....	116
Tabela D.2 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 3.....	117
Tabela D.3 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 4.....	118
Tabela D.4 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 2.....	119
Tabela D.5 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 3.....	120
Tabela D.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 4.....	121
Tabela D.7 - Forças otimizadas e posições dos amortecedores de atrito	122

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EBF	<i>Eccentric Braced Frame</i>
FA	<i>Firefly Algorithm</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GDL	Grau De Liberdade
MSGNS	<i>Multiple Start Guide Neighbourhood</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SBC	<i>Slotted Bolted Connection</i>
AS	<i>Simulated Annealing</i>
TADAS	<i>Triangular Added Damping and Stiffness</i>
TMD	<i>Tuned Mass Damper</i>
TS	<i>Tabu Search</i>
TSFG	<i>Three Stage Friction Grap</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Matriz de amortecimento
E_a	Energia dissipada por amortecimento por atrito
E_d	Energia dissipada por amortecimento viscoso
F_a	Vetor de força de amortecimento
F_{ex}	Vetor de força de excitação
g	Aceleração da gravidade
I	Matriz identidade
I_0	Intensidade de luz na origem
k	Rigidez de um sistema de 1 grau de liberdade (GDL)
K	Matriz de rigidez
m	Massa de um sistema de 1 grau de liberdade (GDL)
M	Matriz de massa
\vec{N}	Vetor de força normal
N_T	Número total de passos de tempo de simulação
r	Distancia entre vagalumes
r_{ij}	Distancia entre vagalume i e o vagalume j
P_a	Força de atrito em coordenadas nodais
ω_j	j -ésima frequência natural
x_i	Coordenada espacial do vagalume i
x_j	Coordenada espacial do vagalume j

β	Atratividade de um vagalume
β_0	Atratividade de um vagalume em uma distancia igual a 0
$\beta_{(r)}$	Função de atratividade
γ	Coefficiente de absorção de luz
ζ_j	j -ésima razão de amortecimento
ζ_{aqj}	Razão de amortecimento modal equivalente
μ	Coefficiente de atrito
Δt	Intervalo de tempo
\vec{x}	Vetor de deslocamento num determinado passo de tempo
$\vec{\dot{x}}$	Vetor de velocidade num determinado passo de tempo
$\vec{\ddot{x}}$	Vetor de aceleração num determinado passo de tempo
Γ	Distância característica dos vagalumes

1. INTRODUÇÃO

Devido à sua importância, o efeito das vibrações em estruturas, tais como edifícios, torres entre outras, causadas por cargas dinâmicas como sismos, a força do vento, máquinas localizadas nas mesmas, entre outras, tem sido foco de estudo por vários pesquisadores, assim como os métodos utilizados para a dissipação da energia transmitida destas forças dinâmicas para a estrutura, evitando danos estruturais ou colapso da mesma.

No caso de estruturas que são submetidas a vibrações provocadas por um tremor de terra, por exemplo, é conveniente a utilização de dispositivos de amortecimento para permitir a dissipação de energia. Esses dispositivos podem ser ativos ou passivos e a sua implementação depende do investimento previsto para o projeto. A grande diferença entre esses dispositivos está em que os amortecedores passivos não alteraram suas propriedades de amortecimento com base na resposta da estrutura e, portanto, não necessitam de nenhum algoritmo de controle para operá-los. Sem qualquer tipo de equipamento de detecção ou de computação, os dispositivos passivos são os menos dispendiosos e mais utilizados.

Entre os tipos de amortecedores passivos de vibração, salienta-se o que utiliza o fenômeno do atrito para produzir a dissipação de energia. Os amortecedores de vibração por atrito apresentam formulações matemáticas mais complicadas que outros tipos de amortecedores, como o viscoso, por exemplo, porém possuem um baixo custo de construção, instalação e manutenção, apresentam boa eficiência no controle de vibrações e necessitam de pouca manutenção.

Em aplicações práticas, como o projeto de prédios, por exemplo, os recursos como tempo e dinheiro são sempre limitados e devem-se encontrar soluções que façam um uso ótimo desses bens. A otimização é o estudo de problemas desse tipo nos quais se precisa minimizar ou maximizar uma função utilizando ferramentas matemáticas. Atualmente as simulações por computador são uma ferramenta indispensável para resolver problemas de otimização com algoritmos de busca eficientes.

A implementação da otimização em sistemas de dissipação de energia é uma área nova, sujeita a mudanças em seus métodos e objetivos. Atualmente existem algumas aplicações de métodos de otimização orientados a minimizar funções como o deslocamento dos andares ou a aceleração dos mesmos através da posição ótima de dispositivos de dissipação de energia. Porém, estas aplicações se resumem aos

amortecedores viscosos ou visco-elásticos e aos amortecedores de massa sintonizada (AMS). Pouco ou nenhum estudo é feito sobre a otimização simultânea de posições e forças de amortecedores por atrito.

Por todas as razões apresentadas acima e por ser um tema pouco explorado no mundo e principalmente no Brasil, a presente dissertação tratará da otimização de amortecedores de vibração por atrito, utilizando um método meta-heurístico para encontrar as posições e as forças de atrito ótimas dos dissipadores de forma simultânea.

1.1 Objetivos

O objetivo principal é:

Otimizar simultaneamente a posição e a força de amortecedores de vibração por atrito para o controle de vibrações em estruturas.

Os objetivos específicos são:

- Inicialmente, desenvolver, em linguagem MATLAB, um programa que utiliza o método das diferenças finitas para análise dinâmica de estruturas planas discretizadas, sem e com a presença de amortecedores por atrito instalados.
- Implementar algoritmos, utilizando o MATLAB, para a otimização da posição nas estruturas e a força dos amortecedores por atrito empregando o recente (*Firefly Algorithm*), para minimização do deslocamento máximo no topo das estruturas, submetidas a dois registros de sismos reais (Caucete e El Centro).

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em 7 capítulos, iniciando com esta introdução, e mais 4 apêndices com resultados adicionais das simulações.

No Capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica sobre as duas grandes linhas de pesquisa desta dissertação: a parte de otimização e a parte amortecedores de vibração. Tratam-se de alguns conceitos básicos de otimização (definições de variável de projeto, função objetivo e restrições), passando pelos métodos meta-heurísticos, e de

conceitos relacionados a amortecedores de vibração, dando-se ênfase aos dispositivos passivos de dissipação de energia.

No Capítulo 3 apresenta-se a revisão bibliográfica sobre amortecedores de vibração e sobre a otimização destes dispositivos. Apresentam-se alguns trabalhos nos quais foram utilizados sistemas de controle passivos de vibrações. Dá-se ênfase aos amortecedores por atrito, discutindo itens como o desempenho sísmico dos mesmos. Por fim são descritos alguns trabalhos sobre projeto ótimo de sistemas de controle passivos de vibrações.

No Capítulo 4 é dada ênfase ao algoritmo meta-heurístico utilizado nesta dissertação, o *Firefly Algorithm* (FA) descrevendo os itens mais importantes e suas características.

No Capítulo 5 são apresentados esquemas computacionais para a representação de sistemas com amortecimento por atrito. Discutem-se dois métodos que facilitam o cálculo de sistemas com atrito: o amortecimento viscoso equivalente e uma representação da função sinal descontínua do atrito de Coulomb por quatro funções contínuas.

No Capítulo 6 são realizadas as simulações numéricas para otimização de amortecedores de vibração por atrito em estruturas submetidas a eventos sísmicos reais. Para este fim foi desenvolvido um programa em linguagem MATLAB. Inicialmente é apresentada a metodologia desenvolvida para realizar a análise dinâmica através do método das Diferenças Finitas, antes e após a instalação dos amortecedores otimizados. Em seguida é apresentada uma validação do programa elaborado, através da comparação da solução numérica com a solução analítica para um sistema de um grau de liberdade. E por fim são apresentadas as estruturas analisadas, as excitações sísmicas consideradas e os resultados da otimização simultânea das posições e forças de amortecedores por atrito nestas estruturas.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice A estão resultados de mais 6 simulações, sendo 3 com 1000 iterações e 3 com 5000 iterações, para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete.

No apêndice B estão resultados de mais 6 simulações, sendo 3 com 1000 iterações e 3 com 5000 iterações, para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro.

No apêndice C estão resultados de mais 6 simulações, sendo 3 com 1000 iterações e 3 com 5000 iterações, para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Caucete.

No apêndice D estão resultados de mais 6 simulações, sendo 3 com 1000 iterações e 3 com 5000 iterações, para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Caucete.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se os conceitos básicos sobre otimização estrutural, bem como sobre formas de amortecimento e dissipação de energia de estruturas.

2.1 Conceitos básicos de otimização

Para a formulação de um problema de otimização é necessário conhecer os seguintes conceitos básicos:

2.1.1 Variáveis de projeto

Segundo Haftka e Gurdal (1992) são os parâmetros do problema que podem ser alterados para otimizar o sistema. Por exemplo, no caso de um conjunto de amortecedores instalados numa estrutura, as variáveis podem representar parâmetros característicos do dispositivo de dissipação de energia, como a força de atrito no caso de amortecedores por atrito e a localização dos amortecedores na estrutura.

As variáveis de projeto são classificadas em discretas e contínuas. As variáveis contínuas podem assumir qualquer valor. Já, as variáveis discretas estão limitadas a valores isolados. O problema em consideração nesta dissertação trata-se de um problema de otimização de variáveis mistas (discretas e contínuas juntas), uma vez que as forças de atrito de cada amortecedor são variáveis contínuas enquanto que as posições dos amortecedores dentro da estrutura são representadas por variáveis discretas.

2.1.2 Função objetivo

Segundo Haftka e Gurdal (1992) deve quantificar o que se quer otimizar e depende das variáveis de projeto. A função objetivo deve ser usada como uma medida da eficiência do projeto. A função objetivo pode ser classificada em simples ou multiobjetivo. A função é dita simples quando tem um único objetivo e é denominada multiobjetivo quando deseja-se otimizar vários objetivos de uma só vez. O sucesso da otimização vai depender da formulação da função objetivo. Assim, é importante

encontrar uma expressão matemática adequada que quantifique corretamente a eficiência do projeto, por exemplo, deslocamento, frequência de ressonância, etc.

2.1.3 Restrições

Segundo Haftka e Gurdal (1992) são as limitações impostas para se obter a solução otimizada. São classificadas em três tipos:

- Uma restrição lateral é do tipo: $x_{\min i} \leq x_i \leq x_{\max i}$ $i = 1, \dots, n$.
- Uma restrição de desigualdade é uma equação do tipo: $g_j(x) \geq 0$, $j = 1, \dots, n_g$.
- Uma restrição de igualdade é do tipo: $h_k(x) = 0$, $k = 1, \dots, n_e$.

onde os parâmetros $x_{\min i}$ e $x_{\max i}$ são os limites entre os quais pode variar a variável de projeto x_i . Assim $g_j(x)$ e $h_k(x)$ são as restrições que estão em função da variável de projeto x .

Além da classificação acima, as restrições são classificadas como locais ou globais. As restrições locais se referem a um ponto localizado no domínio, por exemplo, as restrições de tensão e deslocamento num ponto. As restrições globais se referem à estrutura como um todo, por exemplo, as restrições de volume e frequências de ressonância. Um problema da restrição local surge quando tem que ser definida num grande número de pontos, como ocorre com a tensão mecânica, o que pode aumentar consideravelmente o número de restrições.

Definidas as variáveis de projeto, função objetivo e restrições, um problema de otimização é formulado como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } f(x) \\ & x \\ & \text{tal que } h_k(x) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n_e \\ & g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n_g \end{aligned}$$

Onde $f(x)$ é a função objetivo, x é a variável de projeto, h_k e g_j são as restrições.

2.2 Algoritmos meta-heurísticos

Dentre as várias formas de se resolver um problema de otimização, a utilização de algoritmos meta-heurísticos tem se destacado, por não necessitar de informações sobre as derivadas da função objetivo.

Vários pesquisadores têm desenvolvido e melhorado técnicas robustas de pesquisa na última década que simulam o paradigma de um sistema químico, social ou biológico, e são conhecidos como algoritmos meta-heurísticos (Yang, 2010). Esta alternativa pode ser eficiente para lidar com os desafios que os algoritmos tradicionais de otimização têm enfrentado há anos, sendo particularmente adequada para alcançar soluções rápidas e precisas no campo da otimização estrutural (Miguel *et al.*, 2013).

Os algoritmos meta-heurísticos estão se tornando uma parte importante da otimização moderna. Uma ampla variedade de algoritmos meta-heurísticos surgiu ao longo das duas últimas décadas, e muitos de esses algoritmos tal como o *Particle Swarm Optimisation* (PSO) são cada vez mais populares (Yang, 2011).

Os algoritmos meta-heurísticos ou estocásticos são uma boa alternativa para lidar com uma função objetivo descontínua, uma vez que eles são baseados em randomização e busca local. A randomização fornece uma boa maneira de se afastar de busca local para a pesquisa em escala global. Por isso, quase todos os algoritmos meta-heurísticos pretendem ser adequados para otimização global.

De acordo com Yang (2010), dois componentes principais de qualquer algoritmo meta-heurístico são: intensificação e diversificação, ou a utilização e exploração.

Diversificação significa que o algoritmo deve gerar soluções diversas, de modo a explorar o espaço de busca na escala global, enquanto intensificação significa focar a busca em uma região local, explorando a informação de que uma boa solução atual é encontrada na região. Isto é, em combinação com a seleção das melhores soluções.

A seleção do melhor garante que as soluções irão convergir para o ótimo, ao passo que a via de aleatorização evita diversificação das soluções num mínimo local, e, ao mesmo tempo aumenta a diversidade das soluções. A boa combinação destes dois componentes mais importantes geralmente assegura que o ótimo global seja alcançável.

Existem muitos algoritmos meta-heurísticos diferentes e novas variantes são continuamente propostas. Na presente dissertação o algoritmo estudado é o *Firefly Algorithm* (FA). No Capítulo 4 é apresentada uma breve revisão deste algoritmo.

O FA desenvolvido recentemente por Yang (2008) provou ser mais preciso e eficiente do que os algoritmos heurísticos bem estabelecidos, como os *Genetic Algorithms* (GA) e o *Particle Swarm Optimisation* (PSO). O FA é capaz de, simultaneamente e de forma eficaz, encontrar o ótimo global, bem como ótimos locais e é particularmente adequado para aplicação de processamento em paralelo. Várias pesquisas têm focado a sua atenção na resolução de problemas de otimização utilizando o *Firefly Algorithm* em um número crescente de trabalhos (Miguel *et al.*, 2013).

Os algoritmos meta-heurísticos são adequados para resolver problemas de otimização tais como o apresentado nesta dissertação. Segundo Miguel *et al.* (2013), as vantagens conhecidas destes algoritmos incluem as seguintes:

- 1) Não requerem informação de gradiente e podem ser aplicados a problemas nos quais o gradiente é difícil de obter, ou simplesmente não existe.
- 2) Não ficam presos em mínimos locais se corretamente afinado.
- 3) Podem ser aplicados a funções não lineares ou descontínuas.
- 4) Fornecem um conjunto de soluções ótimas, em vez de uma única solução, dando ao projetista um conjunto de opções para escolher.
- 5) Podem ser facilmente empregados para resolver os problemas de otimização de variáveis mistas (discretas e contínuas em um mesmo problema).

2.3 Amortecimento

O amortecimento é o processo pelo qual os sistemas físicos tais como estruturas, podem absorver e dissipar energia. Portanto, o amortecimento reduz a acumulação da energia de deformação e a resposta do sistema, especialmente em condições de ressonância. Em outras palavras, o amortecimento é utilizado para caracterizar a capacidade das estruturas de dissipar a energia durante a resposta dinâmica (Shoushtari, 2010).

Os valores de amortecimento dependem de vários fatores, tais como amplitude de vibração, material de construção, períodos fundamentais de vibração, formas modais e configurações estruturais (Elnashai, Amr S.; Di Sarno, Luigi, 2008).

De acordo com as pesquisas que têm sido feitas, durante a fase inicial da resposta, há uma rápida acumulação de energia de entrada, semelhante a um carregamento impulsivo. Desta forma, verificou-se que o amortecimento por ciclo é pequeno e, portanto, muitos ciclos são necessários para que a energia de entrada seja

eventualmente dissipada. Assim, quando a razão de amortecimento aumenta, a energia dissipada por ciclo aumenta, e, portanto, a energia armazenada é reduzida (Shoushtari, 2010)

Segundo Shoushtari, 2010, a dissipação é atribuída a certo número de mecanismos externos e internos, que são listados abaixo:

A dissipação de energia devida à viscosidade do material. Na verdade, este processo depende da taxa de tempo de mudança das deformações e é referido ao amortecimento do material. (Amortecimento Viscoelástico).

A dissipação e absorção de energia causada pelo material sofrendo deformação cíclica inelástica e acabando com alguma deformação residual. Em outras palavras, o percurso de deformação elástica cíclica forma um ciclo de histerese, que corresponde à dissipação de energia. (Amortecimento por Histerese).

A dissipação de energia gerada pela superação do atrito entre corpos em movimento que estão em contato, como conexões flexíveis. O amortecimento estrutural é um mecanismo de amortecimento por atrito mais geral.

A dissipação de energia resultante da interação da estrutura com o seu ambiente circundante.

Os dispositivos de amortecimento consistem nos que geralmente são instalados em locais discretos nas estruturas para melhorar as suas capacidades naturais de dissipação de energia. Estes mecanismos podem ser passivos ou ativos. Mecanismo passivo não necessita de energia externa, enquanto mecanismo ativo não pode funcionar sem fonte externa de energia. Os dispositivos passivos incluem viscoso, por atrito, metálicos e de massa sintonizada, entre outros.

Segundo Shoushtari, 2010, as funções dos amortecedores em prédios podem ser:

Reduzir o deslocamento dos andares em estruturas altas.

Reduzir os movimentos de torção acidentais de estruturas de edifícios altos.

O aumento da dissipação da energia de entrada devido ao terremoto (aumentando a razão de amortecimento).

Reduzir a amplitude de vibração em estruturas altas.

2.4 Dispositivos de dissipação de energia

Se uma parte da energia de entrada devido a um sismo é dissipada por meio de dispositivos especiais que podem ser facilmente substituídos, se for necessário, depois de um terremoto, o dano estrutural pode ser reduzido. Estes dispositivos podem ser implantados na concepção de novas estruturas ou adicionados aos edifícios existentes que não sejam suficientemente resistentes contra as cargas sísmicas.

Em sistemas estruturais, a energia de vibração é gradativamente convertida em calor ou som. Em virtude da redução da energia, respostas, tais como o deslocamento do sistema, diminuem gradativamente. O mecanismo pelo qual a energia de vibração é gradativamente convertida em calor ou som é conhecido como amortecimento. Embora a quantidade de energia convertida em calor ou som seja relativamente pequena, é importante considerar o amortecimento para uma previsão precisa da resposta de vibração de um sistema. Admite-se que um amortecedor ideal não tem massa nem elasticidade, e que a força de amortecimento só existe se houver uma velocidade relativa entre as suas duas extremidades (Shoushtari, 2010).

Desde o início da década de 1970, para aplicações em engenharia sísmica, vários tipos de dispositivos de dissipação foram testados e usados. Estes dispositivos podem ser classificados em três categorias: amortecedores viscosos e viscoelástico, amortecedores metálicos, e amortecedores por atrito.

2.4.1 Amortecedor viscoso ou visco-elástico

É o mecanismo de amortecimento mais comumente usado em dissipação de vibrações. Quando os sistemas mecânicos vibram em um meio fluido (como ar, gás, água e óleo), a resistência oferecida pelo fluido ao corpo em movimento faz que a energia seja dissipada. Nesse caso, a quantidade de energia dissipada depende de muitos fatores, como o tamanho e a forma do corpo em vibração, a viscosidade do fluido, a frequência de vibração e a velocidade do corpo em vibração. No amortecimento viscoso, a força de amortecimento é proporcional à velocidade relativa com relação ao fluido do corpo vibratório. Os exemplos típicos de amortecimentos viscosos são (1) película de fluido entre superfícies deslizantes, (2) fluxo de fluido ao redor de um pistão dentro de um cilindro, (3) fluxo de fluido através de um orifício e (4) película de fluido ao redor de um mancal de apoio.

O amortecedor visco-elástico é um dos melhores dispositivos de dissipação. Este tipo de amortecedor dissipa a energia mecânica do edifício, convertendo-a em calor. Vários fatores, tais como temperatura ambiente e a frequência de carregamento irá afetar o desempenho, e a eficácia do sistema de amortecimento. O amortecedor é capaz de aumentar o amortecimento geral da estrutura de forma significativa, por conseguinte, melhorar o desempenho global das estruturas dinamicamente sensíveis. Na Figura 2.1 pode-se observar este tipo de amortecedor.

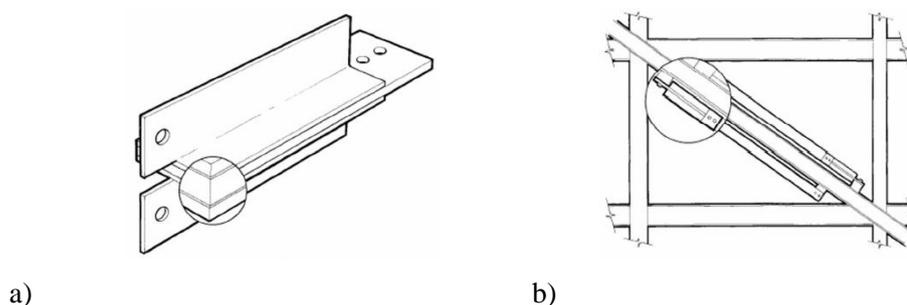


Figura 2.1 - a) Amortecedor Visco-elástico por cisalhamento b) amortecedor visco-elástico com configuração de suporte diagonal. Fonte: (Rai, Reddy, Ramanujam, Venkatraj, & Agrawal, 2009).

Segundo Rai *et al.* (2009), uma configuração de amortecedor visco-elástico pode ser considerado a mais promissora e tem sido instalado em vários edifícios em todo o mundo. É constituído por camadas de material visco-elástico (copolímeros ou substância vítrea) aglomeradas com placas de aço. A energia de vibração é dissipada através da deformação por cisalhamento do material visco-elástico prensado entre placas de aço. (Rai, Reddy, Ramanujam, Venkatraj, & Agrawal, 2009).

2.4.2 Amortecedor de Coulomb ou por atrito seco

O amortecimento, neste caso, é causado pelo atrito entre superfícies em contato que estejam secas ou não tenham lubrificação suficiente. Neste tipo de amortecimento, a magnitude da força de amortecimento é aproximadamente constante, e no sentido oposto ao movimento dos corpos em contato. Os dispositivos dependem da resistência desenvolvida entre duas interfaces de sólidos deslizantes em relação ao outro. Durante excitações sísmicas, o dispositivo desliza a uma carga pré-determinada, proporcionando

a dissipação de energia desejada. Um desses dispositivos é o *Slotted Bolted Connection* (SBC), mostrado na Figura 2.2 (Chopra, 2002).

O amortecedor por atrito, apesar de não ser tão popular quanto o amortecedor viscoso, tem sido muito utilizado atualmente e apresenta vantagens, tais como baixo custo de fabricação, instalação e manutenção e grande capacidade de dissipação de energia. Sua desvantagem é em relação a sua formulação matemática, o que dificulta o cálculo de sistemas que envolvem esse tipo de atrito.



Figura 2.2 - Dispositivo Slotted Bolted Connection SBC. Fonte: (Chopra, 2002)

2.4.3 Amortecedor metálico

Conforme Soong e Dargush (1997), os amortecedores metálicos dissipam a energia através de um comportamento de histerese dos metais quando são deformados em sua faixa não elástica. Uma grande variedade de dispositivos tem sido desenvolvida e testada dissipando a energia por flexão, cisalhamento, ou extensão. A Figura 2.3 mostra o dispositivo *Triangular Added Damping and Stiffness* (TADAS) que utiliza chapas de aço triangulares. Como sugerido por seu nome, este dispositivo aumenta tanto a rigidez quanto o amortecimento da estrutura.

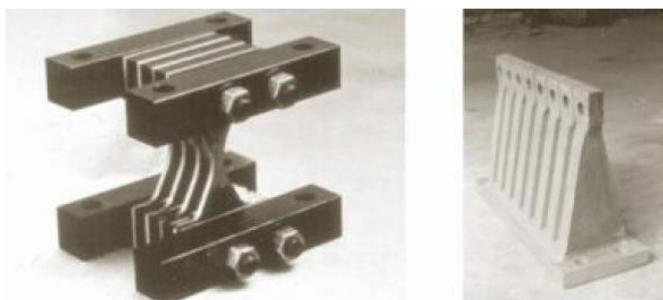


Figura 2.3 - Dispositivo TADAS. Fonte: (Chopra, 2002)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica sobre amortecedores de vibração e sobre a otimização destes dispositivos. Apresentam-se alguns trabalhos nos quais foram utilizados sistemas de controle passivos de vibrações. Dá-se ênfase aos amortecedores por atrito, discutindo itens como o desempenho sísmico dos mesmos. Ao final do capítulo são apresentados alguns trabalhos sobre otimização de amortecedores de vibração.

3.1 Sistemas de controle passivos de vibrações

Como já discutido no capítulo anterior, sistemas passivos de dissipação de energia são aqueles que não requerem nem informações sobre o comportamento da estrutura ou sobre energia externa. Existem vários tipos de dispositivos de controle passivos. Os amortecedores por atrito são um exemplo de dispositivos passivos e utilizam o atrito de Coulomb para dissipar a energia de entrada. Estes amortecedores têm sido amplamente utilizados em muitos projetos em todo o mundo, por causa do seu baixo custo e bom desempenho.

Os amortecedores passivos são os mais antigos e mais comuns dispositivos de controle. Os dispositivos passivos são normalmente colocados no suporte em cruz entre dois andares adjacentes. Eles utilizam diretamente o deslocamento destes andares para produzir uma força de amortecimento sobre o edifício. Ao contrário dos dispositivos ativos e semi-ativos, os dispositivos passivos não alteraram suas propriedades de amortecimento com base na resposta da estrutura e, portanto, não necessitam de nenhum algoritmo de controle para operá-los. Sem qualquer tipo de equipamento de detecção ou de computação, os dispositivos passivos são os menos dispendiosos e mais utilizados.

A adição de amortecedores à estrutura de um edifício pode resultar tanto na redução dos danos como também na eliminação dos custos devido às perdas sofridas depois de um sismo. Segundo De la Cruz *et al.* (2007), o custo dos dispositivos adicionais é de cerca de 1% do custo total da estrutura. Além disso, os dispositivos passivos de amortecimento dissipam a energia a partir da resposta e, por conseguinte, não fazem com que a resposta se torne instável, como poderia acontecer com dissipadores ativos.

O desenvolvimento e caracterização destes dispositivos têm levado a uma nova filosofia de projeto sísmico, que se baseia no aumento da capacidade de dissipação de energia da estrutura em vez de confiar no aumento da rigidez e ductilidade da estrutura. Em outras palavras, a energia de entrada do sismo pode ser consumida pela deformação destes amortecedores mecânicos não estruturais em vez de serem absorvidos pela fratura e dano de membros estruturais principais. Nas últimas três décadas, os dispositivos de controle passivo, bem como os ativos, foram desenvolvidos para suprimir as vibrações estruturais causadas por perturbações ambientais. (De la Cruz *et al.*, 2007).

3.1.1 Tipos de amortecedores

Entre os dispositivos de dissipação de energia existentes, três tipos principais são os mais usados atualmente: amortecedores metálicos, amortecedores por atrito e amortecedores viscosos ou visco elástico. A seguir apresentam-se alguns trabalhos que utilizam diferentes tipos de amortecedores.

A adição de elementos de rigidez e de amortecimento, que são baseados na deformação plástica do aço macio para dissipar a energia e, por conseguinte, reduzir a resposta foi proposto por Scholl, 1990.

Os dispositivos absorvedores de energia de placa cônicos foram propostos e estudados por meio de testes de simulador de terremotos por Pong *et al.*, 2004.

O controle de vibrações em estruturas submetidas a carregamentos de terremotos mediante o uso de elementos *Three-Stage Friction-Grap* (T.S.F.G.), foi proposto por Roik *et al.*, 1988. Desempenho superior dos elementos T.S.F.G. e sua vantagem econômica sobre estruturas de aço dúctil e os sistemas de concreto rígidos foram comprovados por testes experimentais.

Uma técnica inovadora, composta por dispositivos de amortecimento por atrito localizados entre os sistemas de suporte dos edifícios, foi proposta por Pall and Marsh, 1982. O sistema consiste em um mecanismo de baixo custo contendo amortecedores por atrito localizados na interseção do suporte em cruz da estrutura. Cada suporte é provido com uma conexão que, durante um terremoto, é projetado para deslizar antes de exceder a capacidade de cedência de qualquer membro na estrutura.

Um desenvolvimento adicional em dispositivos de absorção de energia é do amortecedor visco-elástico, em que um material polimérico com alta capacidade de dissipação é incorporado na estrutura. Os amortecedores visco elásticos tem sido usados nos últimos 20 anos, como absorvedores de vibração devido ao carregamento do vento nas torres do World Trade Center na cidade de Nova York e, mais recentemente, têm sido incorporados em uma série de outros edifícios. Este novo sistema de amortecimento foi proposto como redutores da resposta sísmica por Kelly e Chalhoub, 1990.

A seleção de um amortecedor depende da estrutura e do ambiente. Os dispositivos metálicos têm uma faixa de comportamento inicial elástica e só dissipam quantidades significativas de energia quando são submetidos a grandes deformações plásticas.

De modo a dissipar a energia, os dispositivos por atrito devem ser carregados para além do limite de escorregamento e, assim, tendem a ser ineficazes sob excitações de pequenas amplitudes. Ambos os tipos de dispositivos são intrinsecamente não lineares, e ambos são mais eficazes contra sismos fortes.

Como a estrutura permanece basicamente elástica, os deslocamentos residuais são então liberados. A Figura 3.1 mostra três esboços de uma armação pertencente a um edifício de vários andares, com dissipadores de energia. As configurações apresentadas são: a) Chevron Braces, b) Diagonal Braces e c) X-Braces.

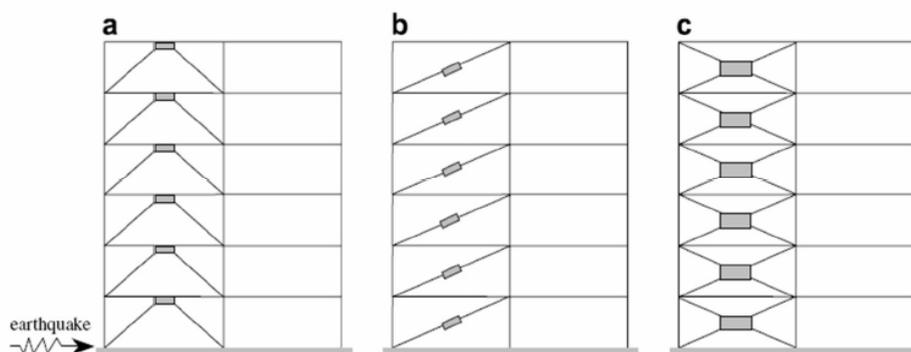


Figura 3.1 - Edifícios equipados com dissipadores de energia externos. Fonte: (De la Cruz *et al.*, 2007).

Os dispositivos de dissipação de energia passiva foram utilizados com sucesso para reduzir a resposta dinâmica de estruturas sujeitas a sismos. A principal razão para a introdução de dispositivos de dissipação de energia em uma estrutura é reduzir o

deslocamento e os danos na estrutura. A redução do deslocamento na estrutura é conseguida pela adição de rigidez e/ou dispositivos de dissipação de energia (amortecedores). Os dispositivos de dissipação de energia metálicos, por atrito e visco-elásticos tipicamente introduzem tanto rigidez quanto amortecimento. Os amortecedores viscosos só vão aumentar o amortecimento na estrutura. Os dispositivos de amortecimento por atrito têm sido utilizados como um componente destes amortecedores porque fornecem uma alta dissipação de energia a um custo relativamente baixo e são fáceis de manter. Em outras palavras, os dispositivos de amortecimento por atrito estão sendo cada vez mais utilizados para novas estruturas devido à sua capacidade de reduzir consideravelmente o deslocamento entre andares, acelerações e forças de cisalhamento. Vários pesquisadores têm estudado procedimentos de projeto para estes amortecedores.

Segundo Shoushtari, 2010, os amortecedores por atrito têm várias vantagens:

A alta capacidade de dissipação de energia por ciclo (em dada amplitude) e capacidade de dissipação total (limitado principalmente pelo desgaste das superfícies deslizantes).

A força de atrito é controlada.

Apresentam insensibilidade ao número de ciclos de carga e não há efeitos da fadiga. Como virtualmente não há nenhuma tensão, o único efeito relevante no transcurso do tempo é a alteração do coeficiente de atrito (por exemplo, devido à corrosão e ao desgaste das superfícies de deslizamento, o que não chega a ser um problema, pois os sismos apresentam curta duração).

Contudo, esses amortecedores apresentam algumas desvantagens, como:

A energia dissipada por ciclo é apenas proporcional ao deslocamento máximo, em vez de ao quadrado deste deslocamento, como é no caso do amortecimento viscoso. Este fato pode ser relevante para pulsos repentinos e entradas mais fortes do que os esperados. Além disso, os picos de ressonância podem não ser devidamente cortados.

Devido às mudanças frequentes e repentinas nas condições de aderência e deslizamento, respostas de alta frequência podem ser geradas. Isso é relevante para o conforto humano e para a segurança de elementos não estruturais, porque acelerações altas podem aparecer.

A durabilidade também é um assunto controverso, principalmente devido à alta sensibilidade do coeficiente de atrito para as condições nas superfícies deslizantes.

Em um estudo recente apresentado por Seong, *et al.* 2012, os amortecedores por atrito foram instalados entre andares para reduzir o deslocamento entre eles em uma estrutura submetida a cargas externas. Os amortecedores são em geral considerados para gerar forças de amortecimentos caracterizadas por amortecimento de Coulomb, com direções opostas às velocidades entre andares da estrutura. A redução da resposta da estrutura como resultado da instalação dos amortecedores pode ser fornecida através da observação da taxa de amortecimento em vez da contribuição da força de atrito dos amortecedores. Portanto, os coeficientes de atrito e amortecimento são parâmetros-chaves, desempenhando um papel fundamental na escolha de um amortecedor por atrito ideal, o que satisfaz o objetivo da redução da resposta.

Segundo Soong e Dargush 1997, vários tipos de amortecedores por atrito foram desenvolvidos, tais como o *Limited Slip Bolted Joint* proposto por Pall 1980, que possui pastilhas de freio revestidas entre as placas de aço para dar uma resposta força-deslocamento consistente e fazer o controle sísmico de grandes estruturas. O amortecedor por atrito de suporte em X (*X-braced Friction Damper*) proposto por Pall e Marsh 1982, incorporando pastilhas de freio revestidas para as superfícies deslizantes para uso em estruturas tipo pórtico. A conexão *Slotted Bolted Connection* foi projetada para aplicações em pórticos de forma concêntrica e proposta por Fitzgerald 1989.

O amortecedor por atrito uniaxial mais recente é o amortecedor por atrito Sumitomo (*Sumitomo Friction Damper*) proposto por Aiken e Kelly 1990, onde a liga de cobre atrita as pastilhas deslizando ao longo do interior da superfície do cilindro de aço e a força normal requerida é dada através da ação da mola contra as calçadeiras internas e externas.

3.2 Desempenho sísmico dos amortecedores por atrito

Filiatrault e Cherry, 1987, estudam uma estrutura de três andares equipada com amortecedores por atrito que foi testada em uma mesa vibratória na Universidade de British Columbia, Vancouver. Mesmo um registro de terremoto com um pico de aceleração de 0,9g não causa dano qualquer à estrutura com amortecimento por atrito, enquanto que as estruturas convencionais foram severamente danificadas em níveis sísmicos inferiores.

Chandra *et al.*, 2000 estudaram um sistema estrutural com amortecimento por atrito adotado para a construção de um prédio de dezoito andares. Ao incorporar os amortecedores por atrito tipo Pall em suporte de aço, o potencial do controle de danos estruturais aumentou consideravelmente. Os resultados de três análises dinâmicas não lineares mostraram desempenho superior de estruturas amortecidas com dispositivos de amortecimento por atrito, em comparação com estruturas amortecidas com outros tipos de dispositivos. A introdução de amortecimento adicional fornecida pelos amortecedores de atrito conseguiu reduzir significativamente as forças de inércia, laterais e a amplitude das vibrações.

Cheung *et al.*, 2000, confirmaram que cargas sísmicas podem causar desastres nos edifícios, especialmente nos antigos. Os acidentes e danos associados com edifícios mais antigos, os quais foram projetados e construídos utilizando normas que são agora conhecidas por oferecer uma segurança inadequada, são muito piores do que para os edifícios mais recentes que foram projetados e construídos de acordo com as exigências de normas mais rigorosas. Em outras palavras, os prédios antigos não são resistentes às cargas laterais. Portanto, algumas tecnologias inovadoras devem ser usadas para melhorar o desempenho destes edifícios quando estão submetidos a um terremoto. Técnicas de melhoramento convencional geralmente incluem o fortalecimento das paredes existentes na estrutura. A maioria destas técnicas muitas vezes leva a consequências custosas, tais como a demolição, longo tempo de construção, reconstrução e realocação dos ocupantes. Neste sentido, a instalação de dispositivos externos, como os amortecedores por atrito, apresenta grandes vantagens.

Durante os últimos anos, o setor de obras públicas e serviços governamentais do Canadá consolidaram a aplicação com sucesso de tecnologias emergentes de baixo custo, tais como os dispositivos de amortecimento passivos.

De acordo com estudos que têm sido feitos do setor de obras públicas e serviços governamentais do Canadá, os dispositivos de amortecimento por atrito tem um desempenho sísmico adequado para edifícios de vários andares. Em outras palavras, os amortecedores por atrito podem efetivamente reduzir o deslocamento dos andares das estruturas, bem como dissipar a energia de um terremoto. A adição de amortecedores por atrito para um edifício existente aumenta a capacidade de suporte à carga sísmica da estrutura por meio da redução da demanda de capacidade de resistência sísmica sobre a carga existente no edifício.

É válido mencionar que os amortecedores por atrito absorvem a energia liberada ou transferida a partir do sismo através do solo para a estrutura do edifício, reduzindo assim a carga que a estrutura do edifício estaria submetida durante o terremoto. A Figura 3.2 apresenta exemplos de amortecedores por atrito instalados em estruturas.

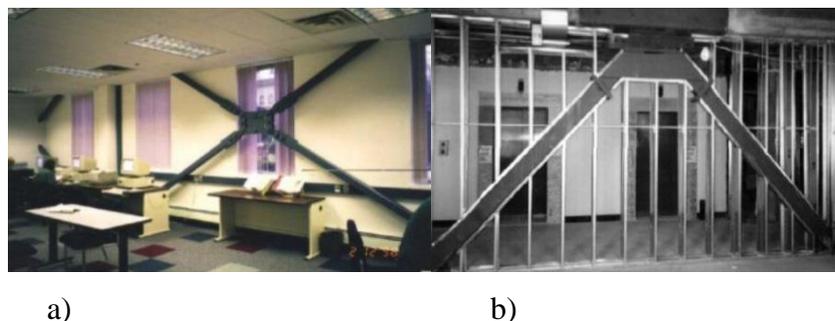


Figura 3.2 - Amortecedores por atrito a) Suporte em X b) Suporte Chevron. Fonte: Cheung *et al.*, 2000.

Balazic *et al.*, 2000, estudaram um edifício de estrutura de concreto de oito andares construído em 1955 de importância histórica. A resistência da estrutura existente é significativamente menor do que a das atuais de construções. O amortecimento adicional em conjunto com rigidez adequada, fornecidas pelos amortecedores por atrito tipo Pall com suporte de aço, oferece uma solução inovadora para a reabilitação sísmica deste edifício. Uma vez que os amortecedores dissipam uma grande parte da energia sísmica, as forças que atuam sobre a estrutura são significativamente reduzidas. O alto custo do trabalho e o tempo requerido no reforço dos pilares da estrutura foram, portanto, evitados. Os resultados de três análises dinâmicas não lineares demonstraram que a amplitude das deflexões laterais e acelerações dos pavimentos foram significativamente reduzidas. Este método de reabilitação sísmica ofereceu tanese redução de custos quanto redução do cronograma de construção em relação aos métodos tradicionais de esforço.

Pasquin *et al.*, 2002 estudaram a influência do uso de amortecedores por atrito para um prédio de nove andares. O edifício de nove andares foi construído em várias fases, de 1925-1959. A propriedade de estabilidade lateral do edifício foi incrementada a partir da ação parcial da estrutura e paredes de enchimento de alvenaria não reforçada. A estrutura existente não era adequada para resistir às forças sísmicas laterais especificadas na norma atual de construção. Em 2000, decidiu-se que os trabalhos de reabilitação sísmica deveriam ser realizados juntamente com grandes reformas para

proteger os investimentos existentes. De acordo com os estudos, a utilização de amortecedores por atrito no suporte de aço foi considerada a solução mais eficaz e econômico para o melhoramento sísmico. Este método original de atualização reduziu significativamente os deslocamentos e cisalhamento na base.

Além disso, aquelas pesquisas sobre amortecedores por atrito feitas pela Sociedade Canadense de Engenharia Civil mostram que, assim que as estruturas sofrem pequenas deformações, os amortecedores por atrito são ativados e começam a dissipar a energia. Uma vez que os amortecedores dissipam uma grande parte da energia sísmica, as forças que atuam sobre a estrutura são consideravelmente reduzidas. Além disso, a maior capacidade de dissipação de energia dos amortecedores por atrito compensa a falta de ductilidade e mitiga os danos a outros componentes não estruturais. Eles descobriram também que a dissipação de energia do amortecedor por atrito é o maior em comparação com outros dispositivos de amortecimento passivo, tais como dispositivos viscosos ou visco elástico.

Como resultado das propriedades anteriores do amortecedor por atrito, menos amortecedores por atrito são necessários para fornecer uma determinada quantidade de amortecimento suplementares. Ao contrário de outros dispositivos, a força máxima de um amortecedor por atrito é pré-definida e continua sendo a mesma para qualquer tremor futuro de terra. Portanto, eles não precisam de inspeção regular, manutenção, reparação ou substituição antes ou depois do terremoto.

Mualla e Belev, 2002, fizeram um estudo sobre a resposta dinâmica de estruturas de aço de um andar equipado com um novo dispositivo de amortecimento por atrito. Muitos testes foram realizados e as simulações numéricas mostraram que a instalação do amortecedor por atrito representa uma alternativa viável para redução de vibração devida a sismos, tanto para novas construções, quanto para a modernização das estruturas existentes. O modelo da estrutura de aço de um andar foi construído e testado, a fim de verificar a eficácia do conceito de sistema de amortecimento de forma experimental. A Figura 3.3 ilustra o ensaio da estrutura com o amortecedor instalado.

Verganelakis e Pall, 2004, estudaram dois edifícios de dez andares com dois subsolos. Os dois edifícios estão interligados com duas pontes. O projetista optou por padrões de desempenho mais elevados do que o especificado em normas de projeto. A introdução de amortecimento adicional em conjunto com rigidez adequada foi a solução escolhida para o controle sísmico. Isto foi economicamente alcançado através da substituição de paredes de cisalhamento de concreto com amortecedores por atrito tipo

Pall em suporte de aço. Assim, um total de 57 amortecedores por atrito de capacidade de deslizamento de carga de 600kN foram instalados em suportes diagonais de aço individuais. O uso de amortecedores por atrito tipo Pall foi usado para fornecer uma solução prática para o controle sísmico do edifício. À medida que os amortecedores por atrito podem dissipar maior parte da energia sísmica, as forças sísmicas exercidas sobre a estrutura e os deslizamentos nos andares são significativamente reduzidos. Neste estudo, são utilizados três registros de sismos que aconteceram nessa região.

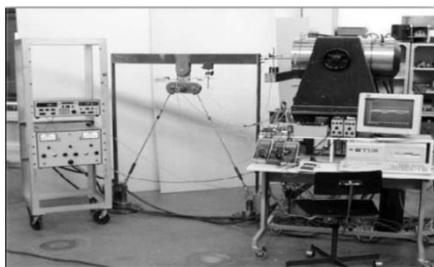


Figura 3.3 - Instalação experimental do modelo da estrutura dimensionada com dispositivos amortecedores por atrito. Fonte: Mualla e Belev, 2002.

Liao *et al.*, 2004, apresentaram os resultados de um projeto de pesquisa internacional dedicado à avaliação do desempenho sísmico de uma estrutura de armação de aço de três andares com um dispositivo de amortecimento de atrito desenvolvido na Universidade Técnica da Dinamarca. Os resultados experimentais mostraram que o dispositivo de amortecimento por atrito tem um desempenho adequado para reduzir os deslizamentos laterais dos andares. A simulação numérica da resposta sísmica da estrutura confirmou os resultados experimentais. A Figura 3.4 mostra os experimentos realizados por Liao *et al.* (2004).

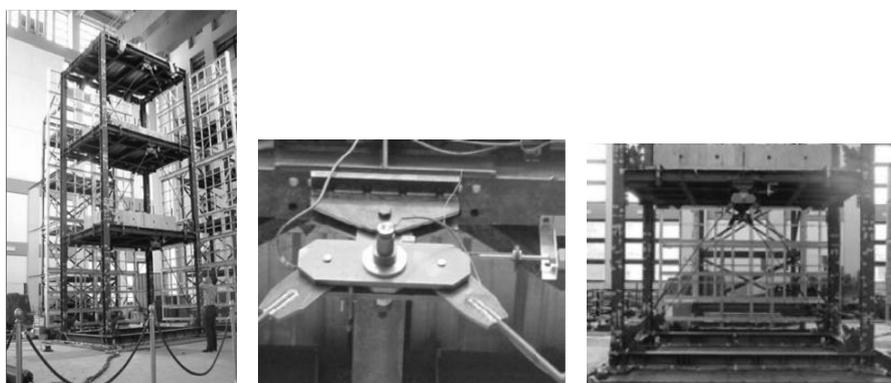


Figura 3.4 - Fotos da estrutura submetida à testes com amortecedor por atrito. Fonte: Liao *et al.*, 2004.

Malhotra *et al.*, 2004 estudaram o prédio do *St. Vincent Hospital*, o qual é uma estrutura composta por cinco blocos de concreto de cinco andares. Um dos blocos do edifício é novo e os outros quatro blocos foram construídos entre 1890 e início dos anos 1950. A resistência sísmica das estruturas existentes foi considerada significativamente menor do que o exigido pelas normas de construção em vigor. Uma vez que os hospitais são de suma importância pós-desastre, os engenheiros recomendaram que as estruturas existentes fossem atualizadas junto com a nova expansão. Os métodos convencionais de reabilitação sísmica com muros de concreto resistentes ao cisalhamento ou suportes rígidos de aço, não foram considerados adequados para este hospital porque estes métodos teriam exigido um trabalho caro e demorado. O amortecimento adicional em conjunto com rigidez adequada ofereceu uma solução inovadora e atraente para a reabilitação sísmica deste hospital. Isto foi conseguido através da introdução de amortecedores por atrito tipo Pall com suporte de aço.

Vezina e Pall, 2004 estudaram o Edifício MUCTC, de dez andares, construído em 1928, o qual é considerado uma estrutura de importância histórica. Em 2000, decidiu-se ampliar o centro de convenções adjacente *Palais des Congrès*. A nova expansão já construída em torno e integrada com o Edifício MUCTC. A expansão levou à atualização sísmica do edifício. Verificou-se que os métodos convencionais de reabilitação sísmica não eram apropriados para o Edifício MUCTC e que amortecimento adicional em conjunto com rigidez adequada ofereceu uma solução inovadora e atraente para a reabilitação sísmica deste prestigiado edifício. Isto foi conseguido através da introdução de amortecedores de atrito tipo Pall com suporte de aço.

Swanson *et al.*, 2004, apresentam a avaliação sísmica e a adequação do projeto dos tanques elevados para armazenamento de água *Renton Highlands* e *Rolling Hills*, utilizando amortecedores por atrito. Devido à idade de cada tanque, ao uso e aos danos causados por sismos recentes, estudos foram realizados para avaliar a sua vulnerabilidade a um terremoto e as opções para adequação. A pesquisa geotécnica específica do local também foi realizada para analisar as condições próximas da superfície, bem como as características físicas e de engenharia dos solos.

Segundo Pall e Pall, 2004, os amortecedores por atrito são projetados para não deslizar durante a ocorrência de vento. Durante um grande terremoto, os amortecedores deslizam antes que ocorra a falha dos componentes estruturais. Como pode ser visto a

partir da Figura 3.5, se o deslizamento é muito baixo ou muito alto, a resposta é muito elevada. Vários estudos paramétricos têm mostrado que o deslizamento do amortecedor por atrito é a variável principal e com a apropriada seleção é possível ajustar a resposta da estrutura a um valor ótimo. Este deslizamento do amortecedor está relacionado à força de atrito do mesmo. Conseqüentemente, uma força de atrito ótima dá uma resposta mínima em termos de deslocamento. A seleção da faixa de deslizamento (ou da força de atrito) deve assegurar que depois de um terremoto o prédio volte para perto de seu alinhamento original. Os estudos também demonstraram que as variações de aproximadamente 20% da faixa de deslizamento ótima não afetam significativamente a resposta.

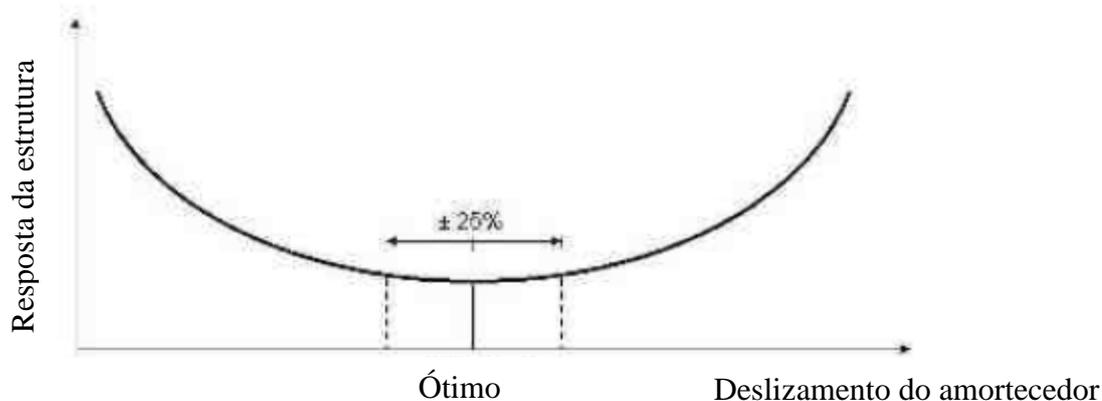


Figura 3.5 - Resposta vs. deslizamento. Fonte: Pall e Pall, 2004

Chang, *et al.*, 2006 estudaram a reabilitação de uma estrutura de aço de seis andares. Verificou-se que a estrutura de aço do edifício e painéis de concreto pré-moldado não satisfaz as exigências atuais das normas de projeto. A estrutura provavelmente sofrerá danos graves em um grande evento sísmico. O prédio está sendo adaptado para diminuir as deficiências estruturais usando dispositivos amortecedores por atrito. Neste esquema 24 amortecedores por atrito de 240kip são colocados no nível do solo e mais 24 amortecedores por atrito de 200kip são colocados no segundo andar. Os resultados da análise mostram que a estrutura readequada é capaz de dissipar a energia sísmica de forma controlável devido à capacidade dos amortecedores por atrito. A Figura 3.6 mostra que o deslocamento dos andares foi reduzido cerca de 50% por causa da utilização dos dispositivos de dissipação de energia por atrito.

Comparação do deslocamento por andar

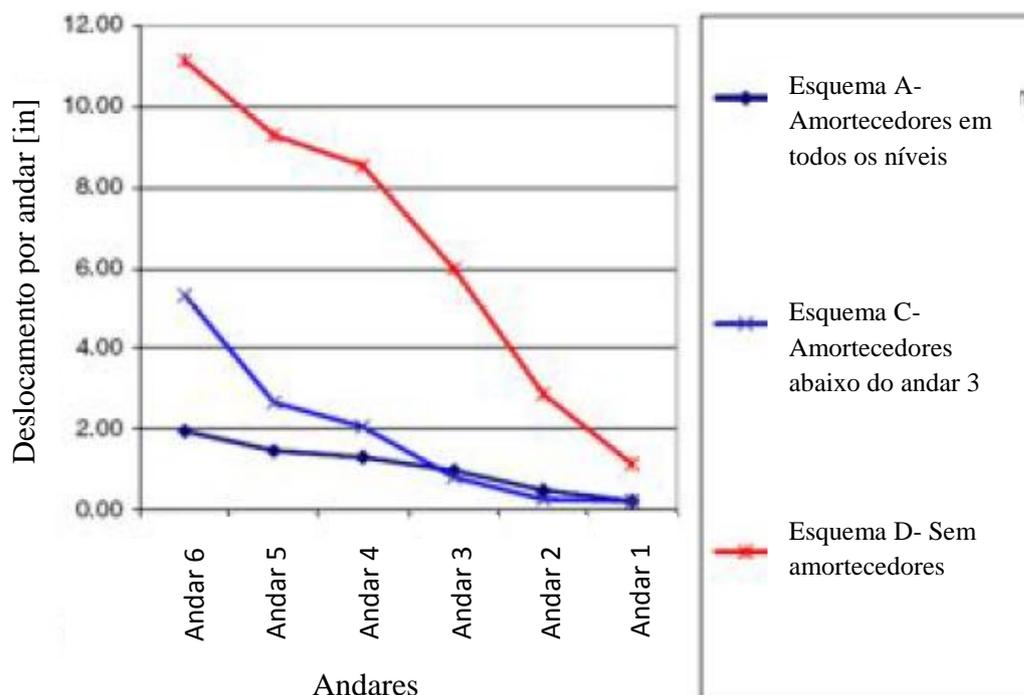


Figura 3.6 - Comparação do deslocamento nos andares. Fonte: Adaptada de Chang *et al.*, 2006.

Shao *et al.*, 2006, estudaram um edifício de 14 andares construído em 1970 com parede de concreto resistente ao cisalhamento localizado na maior área de Seattle. Entre o 3º e o 5º andar, todos os núcleos interiores são suportados por colunas de concreto retangulares localizadas nos cantos desses núcleos, e todas as paredes exteriores do 5º andar são de concreto resistentes ao cisalhamento e apoiadas por colunas de concreto. Isso cria dois andares do tipo *soft storey*. O sistema de amortecimento do *soft-storey* é composto por amortecedores por atrito de suporte em "X" entre as colunas adjacentes que suportam o interior dos núcleos. Estudos indicaram que os *soft-storey* não teriam serviço de manutenção depois de um evento sísmico devido à localização dos amortecedores.

Vaseghi *et al.*, 2009, estudaram o comportamento do *Eccentric Braced Frame* (EBF) e comparam com o desempenho dos amortecedores por atrito quando são instalados em estruturas de aço. Dois edifícios foram escolhidos como referência para este estudo: estruturas de pórtico de cinco e dez andares. Os dois edifícios têm uma disposição idêntica de três baías em planta, de seis metros de extensão e três metros de

altura. A metodologia proposta neste estudo baseia-se na realização de uma análise numérica das estruturas com sistema de amortecedores por atrito. Neste trabalho, as análises dinâmicas não lineares foram realizadas utilizando três registros de terremotos: El Centro (1940), Tabas (Irã, 1978) e Kobe (1995). Os resultados deste estudo mostram que, o deslocamento no topo da estrutura, e as cargas axiais e cortantes na base das colunas dos dois edifícios foram diminuídos utilizando os amortecedores por atrito. A Figura 3.7 ilustra esta redução.

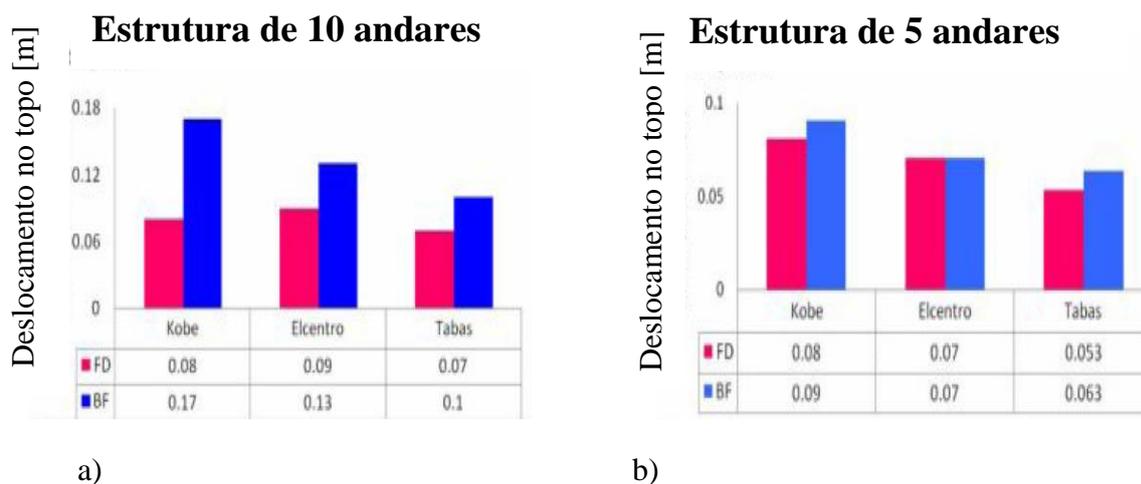


Figura 3.7 - Deslocamento máximo no topo da estrutura, a) estrutura de 10 andares, b) estrutura de 5 andares. Fonte: Vaseghi *et al.*, 2009.

3.3 Otimização do projeto de amortecedores

Duas questões importantes que devem ser resolvidas pelo engenheiro projetista quando se deseja instalar dispositivos para reduzir vibrações são: qual a capacidade que cada amortecedor deve ter e qual é a sua localização ideal dentro da estrutura, rendendo a resposta estrutural desejada por um custo mínimo. Neste contexto, a seguir são apresentados alguns trabalhos que tratam do problema de otimização de amortecedores, os quais tentam propor métodos para responder a estas duas questões.

Chen e Wu, 2001, estudaram os efeitos de um amortecedor de massa sintonizado (TMD) na resposta de uma estrutura de seis andares submetida à excitação sísmica. Vários índices de localização ideais foram definidos com base no raciocínio intuitivo, e um procedimento sequencial foi proposto para o projeto prático e localização dos amortecedores. O procedimento que eles propuseram foi aplicado para colocar os amortecedores dos andares do prédio de seis pavimentos para a redução máxima das

acelerações sob uma carga sísmica estocástica e treze registros de terremotos. Os resultados numéricos mostram que múltiplos amortecedores podem reduzir eficazmente a aceleração da estrutura controlada em pelo menos em um 10-25% mais do que um único amortecedor.

Singh e Moreschi, 2001, apresentaram um método para determinar a quantidade de amortecimento viscoso e visco-elástico que seria necessária para obter um nível desejado de redução da resposta dinâmica da estrutura. Os dispositivos suplementares necessários também são distribuídos de forma ótima na estrutura para conseguir o melhor desempenho. Para resolver o problema de otimização, um método baseado em gradiente é utilizado. Para ilustrar a aplicação, os resultados numéricos para a estrutura de um edifício de 24 andares são apresentados, sendo que o objetivo consiste em atingir a redução máxima das funções de desempenho expressas em termos dos deslocamentos entre andares, o cisalhamento da base ou acelerações nos andares.

Movaffaghi e Friberg, 2006 apresentaram um estudo no qual o objetivo é a colocação de um sistema de amortecimento ótimo com um número dado de amortecedores passivos visco elásticos quando a estrutura (planta nuclear) é sujeita a movimentos sísmicos a fim de reduzir a resposta estrutural em termos da aceleração de um determinado local, por exemplo, uma sala sensível a vibração (reator nuclear). Os pesquisadores utilizaram o *software* IDESIGN incluindo algoritmos genéticos para a tarefa de otimização, o qual tem uma interface com um programa de elementos finitos, *ABAQUS*, para criar uma ferramenta de otimização estrutural. A ferramenta foi testada em uma estrutura tridimensional. Os resultados da otimização para diferentes restrições sobre o número de amortecedores mostraram que oito amortecedores otimamente localizados resulta em uma redução global de 59% da função objetivo.

Marano *et al.*, 2007^a, realizaram a minimização do pico adimensional de deslocamento de uma estrutura linear submetida a um terremoto assumido como um processo estocástico estacionário. Foi proposto um método para o projeto ótimo de amortecedores tipo *Tuned Mass Damper (TMD)*.

Marano *et al.*, 2007^b, apresentam uma nova abordagem para o projeto ideal baseado na confiabilidade de estruturas lineares de vários andares sísmicamente protegidos por amortecedores viscosos. Exemplos numéricos foram desenvolvidos, relativos a uma estrutura de três andares e equipados com amortecedores viscosos. Dois tipos de soluções diferentes foram executados, considerando-se as diferentes

intensidades de sismos. A primeira solução adiciona amortecimento constante em cada andar, enquanto a segunda considera uma distribuição variável do amortecimento.

Cimellaro, 2007 apresenta a variação da rigidez e a localização ótima de amortecedores viscosos utilizando uma função objetivo geral que considera simultaneamente deslocamentos, acelerações absolutas e o cisalhamento da base. A sua amplitude foi minimizada, sujeita à restrição da rigidez e amortecimento totais. O pesquisador validou o algoritmo de otimização através de exemplos numéricos de um edifício de seis andares e de um edifício alto com rigidez não uniforme.

Sgobba e Marano, 2010 apresentam o projeto ótimo de um amortecedor tipo *TMD* para a proteção sísmica em estruturas elásticas. Os pesquisadores modelaram a carga sísmica mediante um processo estocástico estacionário para considerar a sua natureza intrínseca estocástica. O problema de otimização foi definido considerando três diferentes funções objetivos: o máximo desvio padrão do pico do deslocamento estrutural, a histerese média da energia dissipada de um edifício protegido com referência a um edifício desprotegido e um dano funcional que considera os dois índices descritos anteriormente.

Qu e Yang, 2011 combinaram o controle passivo de estruturas com a teoria de controle moderno, utilizando o MATLAB/SIMULINK para estabelecer modelos de simulação baseados no deslocamento e velocidade, de três modelos de estruturas submetidas a excitação sísmica com amortecedores visco-elásticos instalados entre andares. O efeito do controle é comparado para diferentes tipos de amortecedores em diferentes tipos de estruturas através de diferentes tipos de avaliação, que podem fornecer um critério certo de referência para a aplicação e projeto de dispositivos passivos de dissipação de vibrações.

Mohebbi *et al.*, 2012 propuseram um método eficaz para a concepção de ótimos múltiplos amortecedores de massa sintonizados (*MTMD*) para mitigar a resposta sísmica de estruturas com base na definição de um problema de otimização que considera os parâmetros de amortecedores de massa sintonizados como variáveis de projeto e minimização da máxima resposta estrutural como uma função objetivo, enquanto uma série de restrições foram aplicadas nos parâmetros e respostas dos *MTMD*. Um algoritmo genético (*GA*) foi utilizado para resolver o problema de otimização em uma estrutura de dez andares submetida a uma excitação sísmica.

Fang *et al.*, 2012, apresentou um projeto ótimo de um amortecedor de vibrações dinâmicas usando o método de *mini-max* em um sistema primário com amortecimento

por atrito de Coulomb e amortecimento viscoso. Ao mesmo tempo, para reduzir a sensibilidade da resposta do sistema primário para as variações da frequência forçada, um conjunto de equações de restrição, que incluem a característica da distribuição das frequências de ressonância do sistema primário é estabelecido para o projeto ótimo.

Mousavi e Ghorbani-Tanha, 2012, apresentaram um estudo no qual por meio de equações no domínio da frequência, a localização ideal e as características de amortecedores linearmente dependentes da velocidade foram investigados. Nesse estudo, a soma do quadrado dos valores absolutos dos elementos da matriz de transferência para variações entre andares foi considerado como o valor de otimização. A posição ótima e as características dos amortecedores foram obtidas simultaneamente através da minimização do índice de otimização através de um procedimento incremental. Em cada etapa do processo, um valor predefinido foi considerado como a característica do amortecedor. O andar ótimo para este incremento foi selecionado de tal modo a conduzir a um valor mínimo para o índice de otimização.

Rakicevic *et al.*, 2012, realizaram um grande número de experimentos em uma mesa vibratória para estimar a eficácia de um sistema de controle de massa sintonizada. Os pesquisadores, depois de simular diferentes tipos de sismos na estrutura, com e sem sistema de controle de massa sintonizada, demonstraram que este sistema é capaz de reduzir as respostas na ordem de 10% para mais de 50% dependendo da frequência da excitação sísmica e a sensibilidade correspondente da estrutura. As análises foram executadas para definir o efeito da localização do amortecedor e o comportamento dinâmico da estrutura.

Takewaki *et al.*, 2013 propõem um método prático para o projeto ideal de amortecedores não lineares de óleo com mecanismo de alívio instalado em estruturas de vários andares. O problema de projeto ótimo foi formulado de modo a minimizar o deslocamento entre andares e a aceleração no topo da estrutura quando está submetida a uma excitação sísmica em termos de um conjunto de forças de alívio sujeitas a uma restrição de desigualdade na relação máxima entre a força de amortecimento e a força de alívio, e uma restrição de igualdade na soma de forças de alívio dos amortecedores de óleo. Exemplos numéricos foram realizados para demonstrar a validade do método de projeto proposto.

4. FIREFLY ALGORITHM (ALGORITMO DE VAGA-LUME)

Como apresentado anteriormente, os métodos de otimização meta-heurísticos apresentam vantagens para resolver problemas complexos com variáveis mistas (contínuas e discretas), como no caso deste trabalho. Então, para resolver o problema de otimização proposto nesta dissertação, escolheu-se um dos mais recentes algoritmos meta-heurísticos, o *Firefly Algorithm* (FA). Com isso, neste capítulo é apresentada uma descrição detalhada do método de otimização utilizado neste trabalho.

Segundo Yang 2010, o *Firefly Algorithm* (FA) foi proposto por Xin-She Yang na Universidade de Cambridge em 2007. Este algoritmo é baseado na característica bioluminescente de vaga-lumes, insetos coleópteros notórios por suas emissões luminosas. A biologia ainda não tem um conhecimento completo para determinar todas as utilidades que esta luminescência pode trazer ao vaga-lume, mas pelo menos três funções já foram identificadas: (i) como uma ferramenta de comunicação e atração para potenciais parceiros na reprodução; (ii) como uma isca para atração de eventuais presas; e (iii) como um mecanismo de alerta para potenciais predadores.

De acordo com Yang, 2010 há três regras idealizadas na otimização pelo algoritmo *Firefly*:

- Todos os vaga-lumes são considerados unissex (para que um vaga-lume seja atraído por outros vaga-lumes).
- A atração é proporcional ao seu brilho, assim, para quaisquer dos vaga-lumes, o menos brilhante irá se mover para o mais brilhante. A atração é proporcional ao brilho e ambas diminuem na medida em que a sua distância aumenta.
- O brilho de um vaga-lume é influenciado ou determinado pela indicação da função objetivo.

Em outras palavras, Yang, 2010, afirma que um vaga-lume será atraído por vaga-lumes mais brilhantes ao mesmo tempo em que se move de forma aleatória. Esta atração é proporcional à intensidade da luz intermitente a qual diminui com a distância, por isso, a capacidade de atração será avaliada nos olhos de outros observadores (outros vaga-lumes) e a diminuição da intensidade de luz é controlada pelo coeficiente de absorção de luz γ que é, por sua vez, ligada a uma escala característica.

Com base nestas três regras, os passos básicos do *Firefly Algorithm* podem ser resumidos no pseudocódigo mostrado na Figura 4.1.

Início

Função objetivo $f(x)$, $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d)^T$
Gerar população inicial de vagalumes \mathbf{x}_i ($i = 1, 2, \dots, n$)
Intensidade de luz I_i em \mathbf{x}_i é determinada por $f(\mathbf{x}_i)$
Definir coeficiente de absorção de luz γ
enquanto ($t < \text{Máxima Geração}$)
para $i = 1: n$ *para todos n vagalumes*
 para $j = 1: n$ *para todos n vagalumes*
 se ($I_i < I_j$), *mover vagalume i em direção ao vagalume j*; **fim se**
 Variar atratividade com distância r por $\exp[-\gamma r]$
 Calcular novas soluções e atualizar intensidade de luz
 fim para j
 fim para i
 Ordena os vagalumes e encontra a melhor solução global
fim enquanto
 Resultados pós-processamento e visualização

Fim

Figura 4.1 - Pseudocódigo do *Firefly Algorithm*. Fonte: Adaptada de (Yang, 2010).

No FA, a diversificação é representada pelo componente de movimento aleatório, enquanto que a intensificação é implicitamente controlada pela atração dos diferentes vaga-lumes e a força de atração β . Ao contrário de outros algoritmos meta-heurísticos, a interação entre exploração e aproveitamento é intercalada de alguma forma, o que poderia ser um fator importante para o seu sucesso na resolução de problemas de otimização multi-objetivo e multimodal.

Existem dois pontos importantes no FA: a variação da intensidade de luz e a formulação da atratividade. Por simplicidade, assume-se que a atratividade de um vaga-lume é determinada pelo seu brilho que por sua vez está associado à função objetivo, onde o brilho de um vaga-lume em uma determinada localização x pode ser definido como $I(x) \propto f(x)$. Além disso, a atratividade β é relativa, ela pode ser vista pelos olhos de quem vê ou julgada pelos outros vagalumes. Assim, irá variar com a distância r_{ij} entre o vaga-lume i e o vagalume j .

Entretanto, a intensidade de luz diminui com a distância a partir da sua fonte, e a luz é também absorvida no meio, então se deve permitir a variação da atratividade com o grau de absorção.

A intensidade de luz $I(r)$ varia de acordo com a lei do inverso do quadrado da distancia,

$$I(r) = \frac{I(s)}{r^2} \quad (4.1)$$

onde $I(s)$ é a intensidade de luz na fonte. Para um determinado meio com um coeficiente de absorção de luz fixo γ , a intensidade de luz I varia com a distância r , isto é,

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (4.2)$$

onde I_0 é a intensidade de luz na origem. A fim de evitar a singularidade em $r = 0$ na Equação 4.1, o efeito combinado de ambas a lei do inverso do quadrado e absorção podem ser aproximadas pela seguinte forma Gaussiana:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (4.3)$$

Como a atratividade do vaga-lume é proporcional à intensidade de luz vista pelos vaga-lumes adjacentes, define-se a atratividade β de um vagalume por:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (4.4)$$

onde β_0 é a atratividade em $r = 0$. Como é frequentemente mais rápido calcular $1/(1+r^2)$ do que uma função exponencial, a função acima (Equação 4.4), se necessário, pode ser convenientemente aproximada por:

$$\beta = \frac{\beta_0}{(1+\gamma r^2)} \quad (4.5)$$

As equações 4.4 e 4.5 definem a distância característica:

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \quad (4.6)$$

onde a atratividade muda significativamente de β para βe^{-1} na Equação 4.4 ou $\frac{\beta}{2}$ na Equação 4.5.

Na implementação real, a função atratividade $\beta(r)$ pode ser qualquer função monotonicamente decrescente, tal como:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, \quad (m \geq 1) \quad (4.7)$$

Para um γ fixo, o comprimento característico se torna:

$$\Gamma = \gamma^{\frac{-1}{m}} \rightarrow 1, \quad m \rightarrow \infty \quad (4.8)$$

Reciprocamente, para uma dada escala de comprimento Γ em um problema de otimização, o parâmetro γ pode ser usado como um valor inicial típico, isto é:

$$\gamma = \frac{1}{\Gamma^m} \quad (4.9)$$

A distância entre dois vaga-lumes qualquer i e j em x_i e x_j respectivamente, é a distância cartesiana:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (4.10)$$

Onde $x_{i,k}$ é a k -ésima componente da coordenada espacial x_i do i -ésimo vaga-lume. Para o caso bidimensional fica

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.11)$$

O movimento de um vaga-lume i que é atraído por outro vagalume j mais atraente (mais brilhante) é determinado por:

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \epsilon_i \quad (4.12)$$

onde o segundo termo é relativo à atração. O terceiro termo é a randomização com α sendo o parâmetro de randomização, e ϵ_i é um vetor de números aleatórios provenientes de uma distribuição Gaussiana ou distribuição uniforme. Por exemplo, ϵ_i pode ser substituído por $(rand - \frac{1}{2})$ onde $rand$ é um gerador de números aleatórios uniformemente distribuídos em $[0,1]$. Para a maioria das implementações, pode-se considerar $\beta_0 = 1$ e $\alpha \in [0,1]$.

É importante ressaltar que a Equação 4.12 é um caminho aleatório tendencioso em direção aos vaga-lumes mais brilhantes. Se $\beta_0 = 0$, ela se torna um simples caminho aleatório.

O parâmetro γ caracteriza agora a variação da atratividade, e seu valor é de crucial importância na determinação da velocidade de convergência e em como o FA se comporta. Na teoria, $\gamma \in [0, \infty]$, mas na prática, ele é determinado pelo comprimento característico Γ do sistema a ser otimizado. Assim, para a maioria das aplicações, tipicamente ele varia de 0,1 a 10 (Yang, 2010).

Este algoritmo tem a vantagem de que se pode encontrar o ótimo global, bem como a um mínimo local simultaneamente e de forma eficaz. Uma vantagem adicional do FA é que os vaga-lumes funcionam quase de forma independente, ou seja, ele pode ser aplicado em paralelo.

5. ESQUEMAS COMPUTACIONAIS PARA SISTEMAS COM ATRITO SECO

Devido a não-linearidade e descontinuidade da força de atrito seco, o procedimento de cálculo de sistemas que envolvem atrito seco torna-se bastante complicado. Então, neste capítulo são apresentados dois esquemas computacionais que facilitam o cálculo de sistemas com atrito seco: o amortecimento viscoso equivalente, proposto por Tan e Rogers (1995) e uma representação da função sinal descontínua do atrito de Coulomb por quatro funções contínuas, proposto por Mostaghel e Davis (1997).

5.1 Modelo de amortecimento viscoso equivalente para atrito de Coulomb

O primeiro método que se propõem a facilitar o cálculo de sistemas com atrito seco foi proposto por Tan e Rogers (1995) o qual sugere substituir o amortecimento por atrito seco por um amortecimento viscoso equivalente.

5.1.1 Solução analítica

Em um sistema de vários graus de liberdade constituído por massa, mola e amortecedor, a equação de movimento pode ser escrita como:

$$[\mathbf{M}]\ddot{\vec{X}} + [\mathbf{C}]\dot{\vec{X}} + [\mathbf{K}]\vec{X} = \vec{F}_{ex} + \vec{F}_a \quad (5.1)$$

onde \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente, $\ddot{\vec{X}}$, $\dot{\vec{X}}$ e \vec{X} são os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente e \vec{F}_{ex} e \vec{F}_a são os vetores das forças de excitação e atrito seco, respectivamente.

Considerando um sistema de dois graus de liberdade, como o apresentado na Figura 5.1, tem-se que:

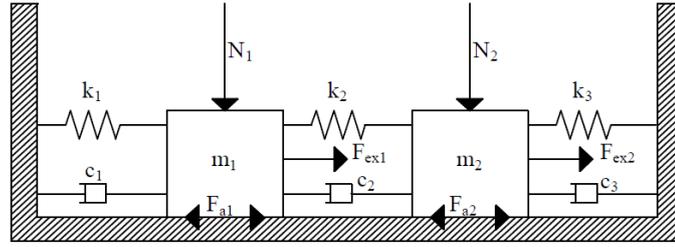


Figura 5.1 - Sistema de dois graus de liberdade com atrito. Fonte: Adaptada de Tan e Rogers, 1995.

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix}, \quad (5.4)$$

Neste sistema, as forças externas são a força normal $\vec{\mathbf{N}}$, a força de excitação horizontal $\vec{\mathbf{F}}_{\text{ex}}$ e a força de atrito seco $\vec{\mathbf{F}}_{\text{a}}$ com a função sinal sgn e o coeficiente de atrito μ , as quais são expressas nas seguintes formas:

$$\vec{\mathbf{N}} = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \end{pmatrix}, \quad (5.5)$$

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{ex}} = \begin{pmatrix} F_{\text{ex1}} \\ F_{\text{ex2}} \end{pmatrix}, \quad (5.6)$$

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{a}} = \begin{pmatrix} F_{\text{a1}} \\ F_{\text{a2}} \end{pmatrix} = -\mu \vec{\mathbf{N}} \text{sgn}(\dot{\mathbf{X}}), \quad (5.7)$$

Para calcular a força de atrito seco F_{a} utilizando a equação (5.7) supondo-se que a força normal N é sempre maior ou igual a zero.

Usando a técnica de superposição modal e a transformação modal $\vec{\mathbf{X}} = \Phi \vec{\mathbf{Y}}$, tem-se:

$$\Phi^T [\mathbf{M}] \Phi = \mathbf{I} \quad (5.8)$$

$$\Phi^T [\mathbf{K}] \Phi = [\omega_j^2] \quad (5.9)$$

$$\Phi^T [\mathbf{C}] \Phi = [2\zeta_j \omega_j] \quad (5.10)$$

onde Φ é a matriz de transformação modal, \mathbf{I} é a matriz identidade, ω_j é a j -ésima frequência natural e ζ_j é a j -ésima razão de amortecimento. Com isso, os lados direitos das equações (5.9) e (5.10) são matrizes diagonais.

Assim, a equação de movimento (5.1) de um sistema de n graus de liberdade é desacoplada em n equações de um grau de liberdade nas coordenadas modais e têm a forma:

$$\ddot{y}_j + 2\zeta_j\omega_j\dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = F_{aj} + F_{exj}, \quad j = 1, 2 \quad (5.11)$$

5.1.2 Análise de energia

Tanto o sistema de coordenadas locais e quanto que no de modais, os valores das componentes de energia dissipada por amortecimento viscoso e atrito seco não variam. Então, essas energias podem ser descritas em ambos os sistemas de coordenadas.

A energia dissipada por amortecimento viscoso, E_d , no intervalo de tempo Δt durante o qual os valores são supostos constantes é dada por:

$$E_d = \{c_1\dot{x}_1^2 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + c_3\dot{x}_2^2\}\Delta t = \vec{X}^T[\mathbf{C}]\vec{X}\Delta t \quad (5.12)$$

$$= \vec{Y}^T[2\zeta_j\omega_j]\vec{Y}\Delta t = \{2\zeta_1\omega_1\dot{y}_1^2 + 2\zeta_2\omega_2\dot{y}_2^2\}\Delta t \quad (5.13)$$

A energia dissipada por amortecimento por atrito seco, E_a , no intervalo de tempo Δt é:

$$E_a = \{F_{a1}\dot{x}_1 + F_{a2}\dot{x}_2\}\Delta t = \vec{X}^T\vec{F}_a\Delta t \quad (5.14)$$

$$= \{\vec{Y}^T\Phi^T(\Phi^T)^{-1}\vec{P}_a\}\Delta t = \{\vec{Y}^T\vec{P}_a\}\Delta t = \{P_{a1}\dot{y}_1 + P_{a2}\dot{y}_2\}\Delta t \quad (5.15)$$

onde $\vec{P}_a = \Phi^T\vec{F}_a$ representa a força de atrito seco em coordenadas modais.

5.1.3 Amortecimento viscoso equivalente para excitação periódica

Se a excitação é periódica, o método da energia para obter o amortecimento equivalente de um sistema de um grau de liberdade pode ser estendido para um sistema de vários graus de liberdade. O sistema pode ser desacoplado usando a matriz modal Φ , obtida a partir dos autovetores da matriz dinâmica \mathbf{D} . Com isso, usando a razão de amortecimento modal equivalente ζ_{aj} ao invés das forças de atrito modais nas equações desacopladas, pode-se obter a razão de amortecimento modal equivalente ζ_{aj} .

Para o sistema de dois graus de liberdade apresentado na Figura 5.1, com frequência de excitação ω , por exemplo, a j -ésima equação modal usando a razão de amortecimento modal equivalente ζ_{aj} é escrita como:

$$\ddot{y}_j + 2(\zeta_j + \zeta_{aj})\omega_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = a_{1j} \sin(\omega t) + a_{2j} \sin(n\omega t) \quad (5.16)$$

sendo a_{1j} e a_{2j} constantes reais. Como a segunda frequência de excitação é o n -ésimo múltiplo da primeira, as forças de excitação são periódicas. Então a solução estacionária da equação (5.16) pode ser escrita como:

$$y_j = b_{1j} \sin(\omega t - \varphi_{1j}) + b_{2j} \sin(n\omega t - \varphi_{2j}) \quad (5.17)$$

Usando a forma da equação (5.13), a energia total dissipada pelo j -ésimo amortecimento modal equivalente por período, E_{epj} , é calculada como:

$$\begin{aligned} E_{epj} &= \int_0^T 2\zeta_{aj} \omega_j \dot{y}_j^2 dt \\ &= 2\zeta_{aj} \omega_j \left\{ b_{1j}^2 \omega^2 \int_0^T \cos^2(\omega t - \varphi_{1j}) dt + n^2 b_{2j}^2 \omega^2 \int_0^T \cos^2(n\omega t - \varphi_{2j}) dt \right\} + \\ &\quad + 2\zeta_{aj} \omega_j \left\{ 2nb_{1j}b_{2j} \omega^2 \int_0^T \cos(\omega t - \varphi_{1j}) \cos(n\omega t - \varphi_{2j}) dt \right\} \\ &= 4\pi\zeta_{aj}(U_{1j} + n^2U_{2j})(\omega/\omega_j) \end{aligned} \quad (5.18)$$

na qual $U_{1j} = \frac{1}{2} \omega_j^2 b_{1j}^2$ e $U_{2j} = \frac{1}{2} \omega_j^2 b_{2j}^2$ são as maiores energias potenciais modais para as duas excitações. $U_{1j} + n^2U_{2j}$ pode ser pensado como a maior energia potencial no período.

Como a energia total dissipada por amortecimento modal equivalente por período E_{epj} é igual a energia total dissipada por atrito E_{apj} , isto é, $E_{epj} = E_{apj}$, a razão de amortecimento modal equivalente pode ser escrita como:

$$\zeta_{aj} = E_{apj} / [4\pi(U_{1j} + n^2U_{2j})(\omega/\omega_j)] \quad (5.19)$$

Como é admitido que ζ_{aj} é constante, a matriz de amortecimento viscoso equivalente pode ser obtida usando a matriz de transformação modal Φ :

$$[C_a] = (\Phi^T)^{-1} [2\zeta_{aj}\omega_j] \Phi^{-1}. \quad (5.20)$$

5.1.4 Amortecimento equivalente instantâneo para excitação não-periódica

Quando a força de excitação externa é não periódica, como são os casos trabalhados nesta dissertação, é desenvolvido um método chamado de método do amortecimento equivalente instantâneo, no qual o valor do amortecimento é calculado baseado na igualdade da energia dissipada por amortecimento viscoso equivalente e por atrito a cada passo de tempo.

Das equações (5.12) à (5.15) a energia dissipada a cada passo de tempo pode ser escrita em ambas as coordenadas modais e locais como:

$$\{2\zeta_{a1}\omega_1\dot{y}_1^2 + 2\zeta_{a2}\omega_2\dot{y}_2^2\}\Delta t = -\{P_{a1}\dot{y}_1 + P_{a2}\dot{y}_2\}\Delta t, \quad (5.21)$$

$$\{c_{a1}\dot{x}_1^2 + c_{a2}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + c_{a3}\dot{x}_2^2\}\Delta t = -\{F_{a1}\dot{x}_1 + F_{a2}\dot{x}_2\}\Delta t, \quad (5.22)$$

onde P_{a1} e P_{a2} são as forças de atrito seco de cada grau de liberdade nas coordenadas modais e os amortecedores por atrito equivalentes c_{a1} , c_{a2} e c_{a3} são tomados para estar em paralelo com o sistema original de amortecedores. Reescrevendo as equações (5.21) e (5.22) tem-se:

$$(2\zeta_{a1}\omega_1\dot{y}_1 + P_{a1})\dot{y}_1 + (2\zeta_{a2}\omega_2\dot{y}_2 + P_{a2})\dot{y}_2 = 0, \quad (5.23)$$

$$c_{a1}\dot{x}_1^2 + c_{a2}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + c_{a3}\dot{x}_2^2 + F_{a1}\dot{x}_1 + F_{a2}\dot{x}_2 = 0, \quad (5.24)$$

Em coordenadas modais

Da equação (5.23) têm-se quatro situações:

1. Se $\dot{y}_1 = \dot{y}_2 = 0$, não há trabalho modal feito por P_{a1} e P_{a2} , então $\zeta_{a1} = \zeta_{a2} = 0$.
2. Se $\dot{y}_1 = 0, \dot{y}_2 \neq 0$ então não há trabalho modal feito por P_{a1} , então $\zeta_{a1} = 0$ e

$$\zeta_{a2} = -P_{a2}/2\omega_2\dot{y}_2. \quad (5.25)$$

3. Se $\dot{y}_1 \neq 0, \dot{y}_2 = 0$ então não há trabalho modal feito por P_{a2} , então $\zeta_{a2} = 0$ e

$$\zeta_{a1} = -P_{a1}/2\omega_1\dot{y}_1. \quad (5.26)$$

4. Finalmente, se $\dot{y}_1 \neq 0, \dot{y}_2 \neq 0$, então supõem-se que

$$\zeta_{a1} = -P_{a1}/2\omega_1\dot{y}_1 \quad (5.27)$$

$$\zeta_{a2} = -P_{a2}/2\omega_2\dot{y}_2 \quad (5.28)$$

Como \dot{y}_j e P_{aj} variam em cada passo de tempo, então ζ_{aj} é um valor instantâneo.

Em coordenadas locais

Supondo que a matriz de amortecimento equivalente é da forma de amortecimento proporcional, que pode conduzir para uma matriz diagonal pela mesma transformação como para as matrizes de massa e rigidez de forma que:

$$[\mathbf{C}_a] = \begin{bmatrix} c_{a1} + c_{a2} & -c_{a2} \\ -c_{a2} & c_{a2} + c_{a3} \end{bmatrix} = q_{10}[\mathbf{M}] + q_{11}[\mathbf{K}] = q_{10} \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} + q_{11} \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

Então:

$$c_{a1} = q_{10}m_1 + q_{11}(k_{11} + k_{12}), \quad c_{a2} = -q_{11}k_{21}, \quad c_{a3} = q_{10}m_2 + q_{11}(k_{21} + k_{22}). \quad (5.30)$$

Substituindo a equação (5.30) na (5.24), onde $k_{12} = k_{21}$, tem-se:

$$q_{10}(m_1\dot{x}_1^2 + m_2\dot{x}_2^2) + q_{11}(k_{11}\dot{x}_1^2 + k_{22}\dot{x}_2^2 + 2k_{12}\dot{x}_1\dot{x}_2) + F_{a1}\dot{x}_1 + F_{a2}\dot{x}_2 = 0. \quad (5.31)$$

onde q_{10} e q_{11} são variáveis independentes e não podem ser determinadas nas equações acima.

Como o trabalho do atrito em cada massa é independente do movimento da outra massa, admite-se que $c_{a2}=0$ e $q_{11}=0$. O sistema original de dois graus de liberdade com atrito é levado a ser o sistema mostrado na Figura 5.2.

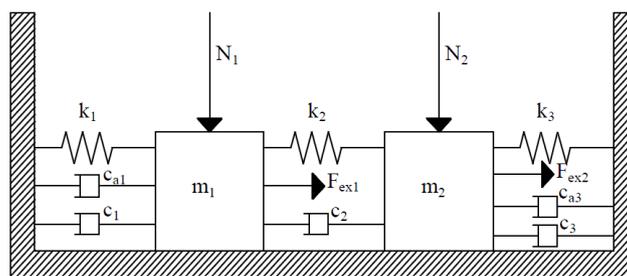


Figura 5.2 - Sistema de 2 graus de liberdade com amortecimento viscoso equivalente.
Fonte: Adaptada de Tan e Rogers, 1995

A equação (5.31) torna-se:

$$q_{10}(m_1\dot{x}_1^2 + m_2\dot{x}_2^2) + F_{a1}\dot{x}_1 + F_{a2}\dot{x}_2 = 0 \quad (5.32)$$

Assim como no caso de coordenadas modais, existem quatro casos para calcular

q_{10} :

1. Se ambas as massas estão paradas então o sistema não tem energia dissipada e $q_{10} = 0$.
2. Se m_1 está deslizando e m_2 está parada, então não há energia dissipada por atrito em m_2 e

$$q_{10} = -F_{a1}/m_1\dot{x}_1. \quad (5.33)$$

3. Se m_2 está deslizando e m_1 está parada, então não há energia dissipada por atrito em m_1 e:

$$q_{10} = -F_{a2}/m_2\dot{x}_2 \quad (5.34)$$

4. Se ambas as massas estão deslizando então:

$$q_{10} = (-F_{a1} - F_{a2})/(m_1\dot{x}_1 + m_2\dot{x}_2) \quad (5.35)$$

onde q_{10} é um valor instantâneo pois F_{aj} e \dot{x}_j são funções do tempo. A matriz de amortecimento equivalente instantânea pode ser obtida por

$$[\mathbf{C}_a] = q_{10}[\mathbf{M}] \quad (5.36)$$

E os valores modais equivalentes podem ser extraídos de:

$$[2\zeta_{aqj}\omega_j] = \Phi^T[\mathbf{C}_a]\Phi \quad (5.37)$$

Deve-se mencionar que esses valores modais equivalentes ζ_{aqj} não são os mesmos valores obtidos das equações (5.25) à (5.28), pois estas duas abordagens são diferentes.

Substituindo as equações (5.8) e (5.36) na equação (5.37), os valores modais equivalentes ζ_{aqj} podem ser obtidos simplesmente de q_{10} , usando:

$$\zeta_{aqj} = q_{10}/2\omega_j \quad (5.38)$$

Com isso, a matriz de amortecimento equivalente instantânea é obtida por:

$$[\mathbf{C}_a] = (\Phi^T)^{-1}[2\zeta_{aqj}\omega_j]\Phi^{-1} \quad (5.39)$$

A matriz de amortecimento equivalente instantânea pode ser usada tanto para excitação periódica quanto para excitação não periódica de um sistema de vários graus de liberdade.

Durante o movimento, as velocidades das massas poderiam passar por zero ou ter valores muito pequenos enquanto param. O cálculo do amortecimento equivalente

instantâneo requer divisão pela velocidade e pode então levar a valores muito altos, que podem causar algumas dificuldades nas simulações. Assim, é necessário limitar seus valores.

Desta forma, pode-se usar uma média do valor do amortecimento equivalente instantâneo para aproximar soluções e simplificar os cálculos. Para reduzir a influência dos valores instantâneos grandes na média, a equação para a média do amortecimento equivalente instantâneo é dada em coordenadas modais, como:

$$\overline{\zeta_{aqj}} = 1 / \left(\frac{1}{N_T} \sum_{N_T} \frac{1}{\zeta_{aj}} \right) \quad (5.40)$$

e em coordenadas locais como:

$$\overline{q_{10}} = 1 / \left(\frac{1}{N_T} \sum_{N_T} \frac{1}{q_{10}} \right) \quad (5.41)$$

nas quais N_T é o número total de passos de tempo da simulação. Se há alguns valores zero de ζ_{aj} ou q_{10} , então esses casos não são levados em conta.

Usando as equações (5.39) à (5.41), a razão de amortecimento modal equivalente média $\overline{\zeta_{aqj}}$ pode ser obtida como:

$$\overline{\zeta_{aqj}} = \frac{\overline{q_{10}}}{2\omega_j} \quad j = 1, 2 \quad (5.42)$$

5.2 Representação do atrito de Coulomb por funções contínuas

Seguindo as propostas de Mostaghel e Davis, 1997, é sugerido que a função sinal descontínua da velocidade de deslizamento na força de atrito seja substituída por uma função contínua. São apresentadas quatro diferentes funções contínuas que podem representar a descontinuidade da força de atrito. Cada uma dessas funções envolve uma constante que controla o nível de precisão daquela representação da força de atrito.

Mostaghel e Davis, 1997 verificou a precisão das várias representações da função sinal por comparação da resposta de um sistema de um grau de liberdade, obtido por solução numérica utilizando aquelas representações, com uma solução analítica exata dada por Den Hartog (1931).

5.2.1 Análise

Sabe-se que a força de atrito de Coulomb é definida por

$$F_a = -\mu mg \operatorname{sgn}[\dot{x}(t)] \quad (5.43)$$

onde F_a representa a força de atrito, m é a massa da estrutura, g é a aceleração da gravidade, $\dot{x}(t)$ é a velocidade de deslizamento como uma função do tempo e μ é o coeficiente de atrito, que é suposto constante. O sinal da velocidade de deslizamento é representado pela função sinal

$$\operatorname{sgn}[\dot{x}(t)] = \begin{cases} +1 & \text{para } \dot{x}(t) > 0 \\ 0 & \text{para } \dot{x}(t) = 0 \\ -1 & \text{para } \dot{x}(t) < 0 \end{cases} \quad (5.44)$$

Considera-se um modelo mecânico de acordo com o apresentado na Figura 5.3.

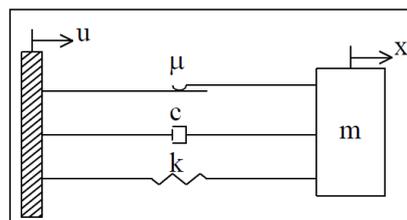


Figura 5.3 - Representação Esquemática do Sistema Considerado. Fonte: Adaptada de Mostaghel e Davis, 1997

O sistema apresentado envolve força restitutiva, força de amortecimento viscoso e força de atrito. A equação de equilíbrio que governa o movimento desse tipo de sistema em fases de deslizamento é dada por

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + m\mu g \operatorname{sgn}[\dot{x}] = -m\ddot{u} \quad (5.45)$$

onde \ddot{u} é a aceleração da base, e x é a resposta em termos de deslocamento. Em fases não deslizantes a velocidade (\dot{x}) e a aceleração (\ddot{x}) são iguais a zero, o deslocamento é constante e $|\omega_n^2 x + \ddot{u}| \leq \mu g$. Na transição da fase não deslizante para a fase deslizante, $|\omega_n^2 x + \ddot{u}| = \mu g$. Deve ser notado que a Equação (5.43) é válida apenas durante as fases deslizantes, desde que o deslocamento relativo x permaneça constante durante cada fase não deslizante. A Equação (5.45) define x para ambas as fases deslizantes e não deslizante.

A forma convencional da equação (5.45) é

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x + \mu g \operatorname{sgn}[\dot{x}] = -\ddot{u} \quad (5.46)$$

onde $\omega_n = \sqrt{k/m}$ é a frequência natural e $\zeta = c/2\omega_n m$ é a razão de amortecimento. Se a aceleração da base é definida por

$$\ddot{u} = a_a \text{sen}\Omega t \quad (5.47)$$

então as seguintes substituições:

$$\tau = \omega_n t, \quad \beta = \Omega/\omega_n, \quad \delta = ma_a/k, \quad x = v\delta \quad \text{e} \quad \alpha = \mu g/a_a$$

na Equação (5.46) produzem

$$\ddot{u} + 2\zeta\dot{u} + v + \alpha \text{sgn}[\dot{u}] = \text{sen}\beta\tau \quad (5.48)$$

A solução analítica da equação (5.48) foi dada por Den Hartog, 1931. Esta solução analítica será usada para validar as várias representações da força de atrito de Coulomb propostas por Mostaghel e Davis, 1997.

A função sinal definida na equação (5.44) pode ser representada por qualquer uma das seguintes quatro funções contínuas para qualquer nível desejado de precisão:

$$\begin{aligned} f_1(\alpha_1, \dot{x}) &= \text{Erf}(\alpha_1 \dot{x}) \\ f_2(\alpha_2, \dot{x}) &= \text{Tanh}(\alpha_2 \dot{x}) \\ f_3(\alpha_3, \dot{x}) &= (2/\pi)\text{ArcTan}(\alpha_3 \dot{x}) \\ f_4(\alpha_4, \dot{x}) &= \alpha_4 \dot{x} / (1 + \alpha_4 |\dot{x}|) \end{aligned} \quad (5.49)$$

A comparação da variação dessas funções com a velocidade de deslizamento, \dot{x} , para o fator $\alpha_i = 10$ ($i = 1, 2, 3, 4$), é dada na Figura 5.4.

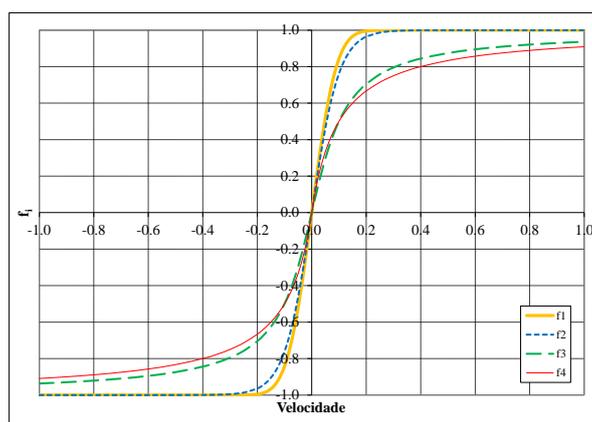


Figura 5.4 - Comparação das Quatro Representações para a Função Sinal. Fonte: Adaptada de Mostaghel e Davis, 1997.

Os valores α_i 's são todos positivos e seus valores ditam o nível desejado de precisão nas suas representações da função sinal. Por exemplo, se a unidade de

velocidade é em mm/s, então um $\alpha_1 = 3,6$ implica que para magnitudes de velocidades maiores que 1 mm/s,

$$f_1(\alpha_1, \dot{x}) = \text{Erf}(3,6\dot{x}) = \pm 1 \quad (5.50)$$

com precisão de seis casas decimais. Logo, se um $\alpha_1 = 3600$ é usado, então para magnitudes de velocidades de deslizamento maiores que 10^{-3} mm/s, o valor da função de erro será de ± 1 com precisão de seis casas decimais. Isso implica que a função $f_1(\dot{x})$ muda continuamente de -1 para $+1$ quando a velocidade vai de -10^{-3} para $+10^{-3}$ mm/s.

De um ponto de vista prático, essas velocidades estão na vizinhança de zero e a função sinal como definida nas relações da equação (5.44) pode ser aproximadamente representada pela função contínua $f_1(\dot{x})$. A Figura 5.5 mostra a variação de $f_1(\dot{x})$ com a velocidade de deslizamento para o fator $\alpha_1 = 1,8$, $\alpha_1 = 3,6$ e $\alpha_1 = 3600$.

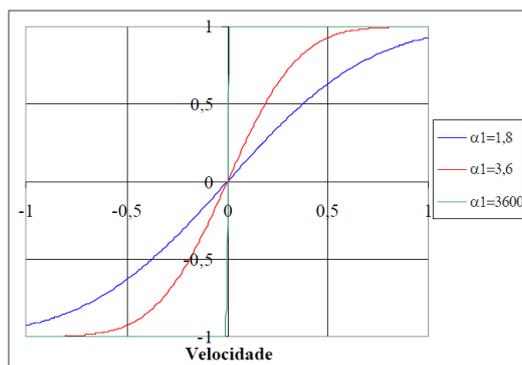


Figura 5.5 - Representação da função sinal por f_1 . Fonte: Adaptada de Mostaghel e Davis, 1997.

Argumentos semelhantes aplicam-se às outras três funções na equação (5.49) exceto que valores diferentes de α_i tenham que ser usados para ganhar os equivalentes níveis de precisão. Considerando esses resultados, pode ser concluído que para α_i suficientemente grande para aplicações práticas,

$$\text{sgn}[\dot{x}] = f_i[\alpha_i, \dot{x}] \quad (5.51)$$

Assim para α_i suficientemente grande, a força de atrito da equação (5.43) pode ser representada por:

$$F_a(t) = -\mu m g f_i[\alpha_i, \dot{x}(t)], \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.52)$$

e a função sinal nas equações (5.45), (5.46) e (5.48) pode ser substituída por f_i , $i = 1, 2, 3, 4$.

Deve ser notado que as representações da força de atrito como definido pela Equação (5.52) são válidas apenas quando a massa está em uma fase de deslizamento. Em fases não deslizantes, a força de atrito é indefinida e sua magnitude é menor que a dada pela Equação (5.52).

5.2.2 Verificação

Antes de usar as representações propostas para a força de atrito para resolver o problema geral de excitação da base da Equação (5.46), as mesmas serão usadas para resolver problemas de excitação harmônica da base representadas pela Equação (5.48). A solução analítica de Dan Hartog (1931) permite validar a qualidade das representações propostas. A Tabela 5.1 apresenta as respostas em termos de deslocamentos máximos não dimensionalizados (para o caso $\beta = 1$) obtidas pela solução analítica e por várias representações da força de atrito de Coulomb para $\alpha = \mu g/a_a = 0,40$ e $\alpha = \mu g/a_a = 0,50$, um amortecimento $\zeta = 2$ e 5%, e para o fator $\alpha_i = 10, 100$ e 1000. Como pode ser observado nesta tabela, em todos os casos, quando o fator a_i é da ordem de 100 ou mais, a diferença máxima com a solução analítica é menor que 1%.

Tabela 5.1 - Comparação das Representações com a Solução de Den Hartog

ζ	0,02		0,05		Fator α_i
	$\alpha = \mu g/a_a$	0,4	0,5	0,4	
Den Hartog		12,2824	9,1029	4,9274	3,6589
f_1		12,2359	9,0611	4,9058	3,6327
		12,2354	9,0598	4,9052	3,6313
		12,2352	9,0597	4,9052	3,6313
f_2		12,2358	9,0612	4,9062	3,6335
		12,2353	9,0601	4,9052	3,6313
		12,2352	9,0599	4,9052	3,6313
f_3		12,3402	9,2348	5,0064	3,7978
		12,2459	9,0781	4,9157	3,6489
		12,2363	9,0621	4,9063	3,6331
f_4		12,3950	9,3229	5,0548	3,8722
		12,2518	9,0879	4,9214	3,6585
		12,2369	9,0629	4,9068	3,6341

Fonte: Adaptada de Mostaghel e Davis, 1997.

Observando-se que a solução numérica para várias representações de força de atrito de Coulomb foi validada por comparação com a solução analítica de Den Hartog (1931), conclui-se que se podem usar essas representações na análise dinâmica de qualquer sistema envolvendo atrito seco.

Considerando os resultados apresentados na Tabela 5.1 e outros exemplos encontrados em Mostaghel e Davis, 1997, em que os níveis de μg alcançam de 40 a 90% da aceleração de pico da excitação, pode ser concluído que as aproximações propostas para a força de atrito são aplicáveis tanto para pequenos quanto para grandes valores de coeficientes de atrito. Naturalmente, o nível de aproximação pode ser melhorado usando valores maiores para α_i . Note que a Equação (5.52) é válida mesmo se o coeficiente de atrito é uma função da velocidade de deslizamento ou uma função do tempo.

Outro caso no qual é utilizado um modelo de representação do atrito é apresentado no trabalho de Sobczyk *et al.*, 2012. Nesse trabalho, os autores apresentam uma nova aproximação contínua do modelo LuGre, com o objetivo de melhorar a sua aplicabilidade no controle de uma classe de sistemas que incluem servo posicionadores orientados por fluidos. O principal atrativo da aproximação proposta é a preservação das propriedades do contorno limitado e passividade que são inerentes ao modelo LuGre original, uma característica que não é garantida nos modelos aproximados que são geralmente encontradas na literatura especializada. As propriedades mais pertinentes da aproximação proposta são demonstradas analiticamente, e sua aplicabilidade está ilustrada tanto analítica quanto experimentalmente no caso de um servo posicionador pneumático.

6 APLICAÇÕES PRÁTICAS

A partir dos conceitos teóricos apresentados anteriormente e com o objetivo de complementá-los, neste capítulo ilustra-se o procedimento de otimização proposto nesta dissertação, através da otimização simultânea da localização e da força de atrito de um número máximo de amortecedores de vibração por atrito em duas estruturas de edifícios submetidas cada uma delas a dois eventos sísmicos reais.

6.1 Resposta dinâmica de estruturas pelo método das Diferenças Finitas

Com o objetivo de demonstrar a eficácia do método proposto para otimização de amortecedores de vibração por atrito, inicialmente as estruturas são analisadas considerando-se apenas os seus próprios amortecimentos e posteriormente, comparam-se essas respostas sem dissipadores de energia externos com as respostas obtidas após a instalação de amortecedores por atrito de forma otimizada em relação à posição e à força de atrito simultaneamente.

Cabe destacar que no problema de otimização considerado, a função objetivo adotada é o deslocamento máximo da estrutura, o qual ocorre no topo do prédio. As variáveis de projeto são as possíveis posições dos amortecedores dentro da estrutura assim como as respectivas forças de atrito de cada amortecedor. As restrições são o número máximo de posições disponíveis dentro da estrutura, o número máximo de amortecedores a ser instalado, e os limites inferior e superior das forças de atrito de cada amortecedor. É importante ressaltar que o número máximo de amortecedores a ser otimizado e instalado é critério do projetista e depende da estrutura e as suas características, por exemplo, o número de pavimentos.

No caso em que a equação diferencial de movimento de um sistema vibratório não pode ou é muito difícil de ser resolvida analiticamente, é preciso usar uma abordagem numérica. Há vários métodos numéricos à disposição para a solução de problemas de vibração e nesta dissertação foi implementado o método das diferenças finitas para obter a resposta dinâmica das estruturas estudadas.

Segundo Rao, 2010 existem duas características importantes nos métodos numéricos:

A primeira é que não pretendem satisfazer a equação diferencial ou equações diferenciais governantes em todos os tempos t , somente em intervalos discretos separados por um Δt .

A segunda trata-se que há um tipo de variação adequada do deslocamento x , da velocidade \dot{x} e da aceleração \ddot{x} dentro de cada intervalo de tempo Δt .

No método das diferenças finitas a ideia principal é usar aproximações de derivadas. Dessa forma, a equação diferencial de movimento governante e as condições de contorno associadas, se aplicáveis, são substituídas pelas equações de diferenças finitas correspondentes. Neste método o domínio da solução (no qual a solução da equação diferencial dada é solicitada) é substituído por um número finito de pontos que correspondem a uma malha ou grade de pontos (normalmente os pontos da grade estão igualmente espaçados ao longo de cada uma das coordenadas independentes) e determinam-se os valores da solução desejada nesses pontos.

No problema em consideração nesta dissertação, que foi resolvido pelo método das diferenças finitas, a equação de movimento do sistema é dada por:

$$[\mathbf{M}]\ddot{\vec{X}} + [\mathbf{C}]\dot{\vec{X}} + [\mathbf{K}]\vec{X} = \vec{F}_{ex} \quad (6.1)$$

onde \vec{F}_{ex} é a força de excitação externa, $[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{C}]$ e $[\mathbf{K}]$ são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respetivamente, e \vec{X} , $\dot{\vec{X}}$ e $\ddot{\vec{X}}$ são os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração, respectivamente.

Fazendo-se:

$$\vec{F}_e = \vec{F}_{ex} - [\mathbf{C}]\dot{\vec{X}} - [\mathbf{K}]\vec{X} \quad (6.2)$$

Pode-se escrever a equação (6.1) como:

$$[\mathbf{M}]\ddot{\vec{X}} = \vec{F}_e \quad (6.3)$$

Pelo método de diferenças finitas sabe-se que:

$$\ddot{\vec{X}}_j = \frac{\vec{X}_{j+1} - 2\vec{X}_j + \vec{X}_{j-1}}{\Delta t^2} \quad (6.4)$$

$$\dot{\vec{X}}_j = \frac{\vec{X}_j - \vec{X}_{j-1}}{\Delta t} \quad (6.5)$$

onde Δt é o intervalo de tempo de integração e \vec{X}_j é o vetor de deslocamentos em um determinado passo de tempo j .

Substituindo-se as equações (6.4) e (6.5) em (6.3), no passo de tempo j , obtêm-se os deslocamentos no passo de tempo seguinte (em $j + 1$):

$$\vec{X}_{j+1} = 2\vec{X}_j - \vec{X}_{j-1} + [\mathbf{M}]^{-1}\Delta t^2 \left(\vec{F}_{exj} - \frac{[\mathbf{C}]}{\Delta t}(\vec{X}_j - \vec{X}_{j-1}) - [\mathbf{K}]\vec{X}_j \right) \quad (6.6)$$

$$\vec{X}_{j+1} = 2\vec{X}_j - \vec{X}_{j-1} + [\mathbf{M}]^{-1}\Delta t^2 \vec{F}_{ej} \quad (6.7)$$

Este método é condicionalmente estável, isto é, para que a estabilidade seja assegurada, o intervalo de integração Δt deve ser menor que um valor crítico, definido por:

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{nn}} = \frac{2}{2\pi f_n} = \frac{T_n}{\pi} \quad (6.8)$$

sendo T_n o menor período natural de vibração do sistema com n graus de liberdade (GDL) e ω_{nn} é a corresponde maior frequência natural.

6.2 Resposta dinâmica de estruturas com amortecedores por atrito

Após a análise das estruturas sem dissipadores externos, foi considerada a instalação de amortecedores por atrito na disposição apresentada na Figura 6.1.

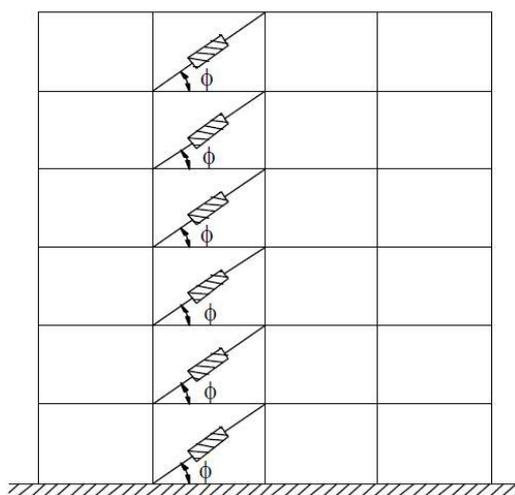


Figura 6.1 - Localização dos amortecedores

A equação de movimento para este caso é dada por:

$$[\mathbf{M}]\ddot{\vec{X}} + [\mathbf{C}]\dot{\vec{X}} + \vec{F}_a + [\mathbf{K}]\vec{X} = \vec{F}_{ex} \quad (6.9)$$

sendo a força de atrito \vec{F}_a expressa por:

$$\vec{F}_a = \mu \cos \phi \{N_i \text{sgn}(\dot{X}_i - \dot{X}_{i-1}) - N_{i+1} \text{sgn}(\dot{X}_{i+1} - \dot{X}_i)\} \quad (6.10)$$

onde μ é o coeficiente de atrito, N_i é a força normal do pavimento i e \dot{X}_i é a velocidade do pavimento i . Os termos entre chaves representam vetores.

Fazendo o mesmo raciocínio anterior, tem-se:

$$\vec{F}_e = \vec{F}_{ex} - [\mathbf{C}]\dot{\vec{X}} - [\mathbf{K}]\vec{X} \quad (6.11)$$

Com isso, pode-se escrever a equação (6.9) da forma:

$$[\mathbf{M}]\ddot{\vec{X}} = \vec{F}_e - \vec{F}_a \quad (6.12)$$

Considerando-se o explicado no Capítulo 5, Seção 5.2, a função sinal na força de atrito pode ser substituída pela função tangente hiperbólica. Então, a equação (6.10) fica da forma:

$$\vec{F}_a = \mu \cos \phi \{N_i \tanh(1000 (\dot{X}_i - \dot{X}_{i-1})) - N_{i+1} \tanh(1000 (\dot{X}_{i+1} - \dot{X}_i))\} \quad (6.13)$$

E, substituindo-se as equações (6.4) e (6.5) em (6.12), no passo de tempo j e no andar i , obtêm-se os deslocamentos no passo de tempo seguinte ($j+1$):

$$\vec{X}_{j+1} = 2\vec{X}_j - \vec{X}_{j-1} + [\mathbf{M}]^{-1} \Delta t^2 \left(\vec{F}_{exj} - \frac{[\mathbf{C}]}{\Delta t} (\vec{X}_j - \vec{X}_{j-1}) - [\mathbf{K}]\vec{X}_j - \vec{F}_{aj} \right) \quad (6.14)$$

$$\vec{X}_{j+1} = 2\vec{X}_j - \vec{X}_{j-1} + [\mathbf{M}]^{-1} \Delta t^2 (\vec{F}_{ej} - \vec{F}_{aj}) \quad (6.15)$$

6.3 Validação do programa elaborado

Com o objetivo de validar o programa desenvolvido, descrito na Seção 6.2, para a determinação da resposta de estruturas com amortecedores por atrito utilizando o método das diferenças finitas, o qual foi programado no *software* MATLAB, foi realizada a simulação numérica de um sistema de 1 grau de liberdade, conforme se mostra na Figura 6.2, em vibração livre com amortecimento por atrito. A resposta

obtida pelo programa numérico elaborado foi comparada com a solução analítica, a qual é apresentada a seguir.

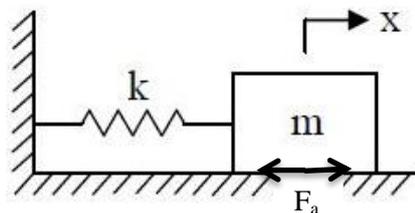


Figura 6.2 - Sistema de 1 GDL em vibrações livres com atrito seco

A equação de movimento de um sistema com amortecimento por atrito, em vibrações livres, como o apresentado na Figura 6.2, é expressa por:

$$m\ddot{x} \pm \mu N + kx = 0 \quad (6.16)$$

na qual m é a massa do sistema, \ddot{x} é a aceleração, μ é o coeficiente de atrito, N é a força normal, k é a rigidez e x é o deslocamento. Observa-se que o sinal muda dependendo do sentido da velocidade.

Quando a velocidade tem sentido positivo, a equação (6.16) torna-se:

$$m\ddot{x} + \mu N + kx = 0 \quad (6.17)$$

Cuja solução é:

$$x(t) = A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t - \frac{\mu N}{k} \quad (6.18)$$

sendo A_1 e A_2 constantes que dependem das condições iniciais desta fase do movimento.

Quando a velocidade tem sentido negativo, a equação (6.16) torna-se:

$$m\ddot{x} - \mu N + kx = 0 \quad (6.19)$$

Cuja solução é:

$$x(t) = A_3 \cos \omega_n t + A_4 \sin \omega_n t + \frac{\mu N}{k} \quad (6.20)$$

sendo A_3 e A_4 constantes que dependem das condições iniciais desta fase do movimento.

Considerando que as condições iniciais do sistema são deslocamento $x(0) = x_0$ e velocidade $\dot{x}(0) = 0$, podem-se determinar as constantes A_3 e A_4 para o caso que a velocidade tem sentido negativo.

$$x(0) = A_3 + \frac{\mu N}{k} = x_0 \rightarrow A_3 = x_0 - \frac{\mu N}{k} \quad (6.21)$$

$$\dot{x}(0) = A_4 \omega_n = 0 \rightarrow A_4 = 0 \quad (6.22)$$

Então substituindo as constantes A_3 e A_4 na equação (6.20) obtém-se a equação (6.23) para determinação do deslocamento no primeiro meio ciclo, ou seja, $0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_n}$.

$$x(t) = \left[x_0 - \frac{\mu N}{k} \right] \cos \omega_n t + \frac{\mu N}{k} \quad (6.23)$$

$$\dot{x}(t) = \left[\frac{\mu N}{k} - x_0 \right] \omega_n \sin \omega_n t \quad (6.24)$$

Quando $t = \frac{\pi}{\omega_n}$ a massa está em sua a posição extrema e a velocidade troca de sentido, conseqüentemente também troca a equação do movimento. Para que ocorra a continuidade do movimento, as condições finais (deslocamento e velocidade) em $t = \frac{\pi}{\omega_n}$ devem ser as condições iniciais para a outra equação. Desta forma as equações (6.23) e (6.24) no tempo $t = \frac{\pi}{\omega_n}$ fica assim:

$$x\left(\frac{\pi}{\omega_n}\right) = \left[x_0 - \frac{\mu N}{k} \right] \cos \omega_n \frac{\pi}{\omega_n} + \frac{\mu N}{k} = \frac{2\mu N}{k} - x_0 \quad (6.25)$$

$$\dot{x}\left(\frac{\pi}{\omega_n}\right) = \left[\frac{\mu N}{k} - x_0 \right] \omega_n \sin \omega_n \frac{\pi}{\omega_n} = 0 \quad (6.26)$$

Portanto, estas são as condições iniciais para a determinação das constantes A_1 e A_2 :

$$x\left(\frac{\pi}{\omega_n}\right) = A_1 \cos \omega_n \frac{\pi}{\omega_n} + A_2 \sin \omega_n \frac{\pi}{\omega_n} - \frac{\mu N}{k} = \frac{2\mu N}{k} - x_0 \rightarrow A_1 = x_0 - \frac{3\mu N}{k} \quad (6.27)$$

$$\dot{x}\left(\frac{\pi}{\omega_n}\right) = -\left[x_0 - \frac{3\mu N}{k} \right] \omega_n \sin \omega_n \frac{\pi}{\omega_n} + A_2 \omega_n \cos \omega_n \frac{\pi}{\omega_n} = 0 \rightarrow A_2 = 0 \quad (6.28)$$

Logo, nesta segunda metade do ciclo do movimento, o deslocamento e a velocidade são expressos por:

$$x(t) = \left[x_0 - \frac{3\mu N}{k} \right] \cos \omega_n t - \frac{\mu N}{k} \quad (6.29)$$

$$\dot{x}(t) = \left[\frac{3\mu N}{k} - x_0 \right] \omega_n \sin \omega_n t \quad (6.30)$$

No final do segundo meio ciclo em $t = \frac{2\pi}{\omega_n}$, quando a velocidade muda novamente seu sinal, o deslocamento e a velocidade atingirão os seguintes valores:

$$x\left(\frac{2\pi}{\omega_n}\right) = x_0 - \frac{4\mu N}{k} \quad (6.31)$$

$$\dot{x}\left(\frac{2\pi}{\omega_n}\right) = 0 \quad (6.32)$$

Sendo estas as condições do terceiro meio ciclo, quando novamente passa a valer a primeira equação com a sua solução.

Assim, o movimento prosseguirá mudando de equação a cada meio ciclo, até que no final de um determinado meio ciclo o deslocamento seja tão pequeno que a força da mola seja incapaz de vencer a força de atrito estático.

Este procedimento analítico foi programado no *software* MATLAB e a resposta foi comparada com a obtida utilizando o programa numérico desenvolvido. A comparação está ilustrada nas figuras 6.3 e 6.4 para um sistema cuja frequência natural é 25rad/s, o coeficiente de atrito é 0,2 e o deslocamento inicial é 0,15m.

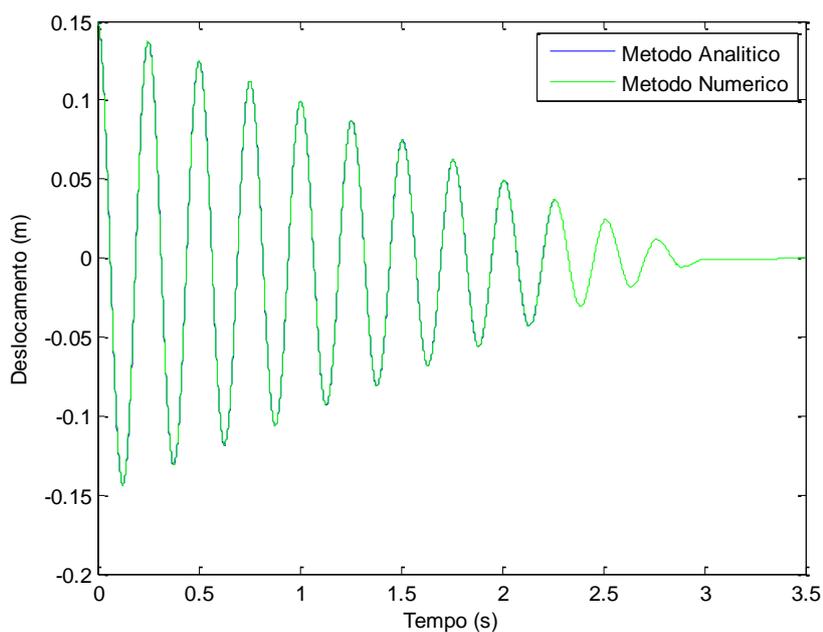


Figura 6.3 - Comparação da resposta do método analítico com o método numérico

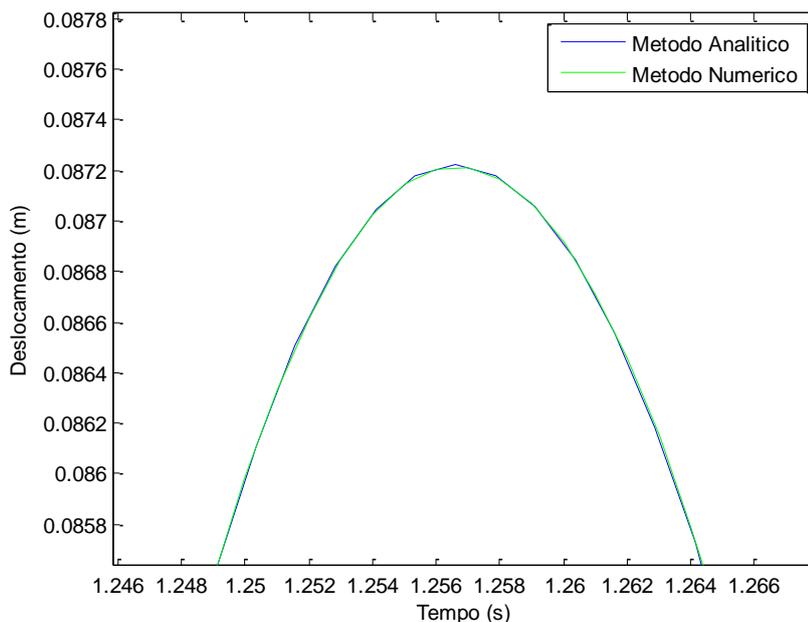


Figura 6.4 - Comparação das respostas no quinto ciclo

Como pode ser observado nas figuras 6.3 e 6.4, na qual é ampliada a amplitude de deslocamento no quinto ciclo, as respostas obtidas pelos dois métodos estão sobrepostas, concluindo-se, assim, que o método numérico desenvolvido está correto.

Uma nova validação do programa numérico desenvolvido foi realizada comparando a resposta numérica de um sistema de três graus de liberdade em vibração livre com amortecimento por atrito, observado na Figura 6.5, com a sua solução analítica.

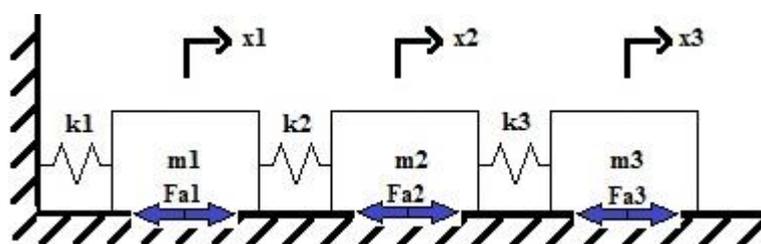


Figura 6.5 - Sistema de 3 GDL em vibrações livres com atrito seco

Na Tabela 6.1 são apresentadas as propriedades do sistema de três graus de liberdade implementado na validação do método numérico.

Tabela 6.1 - Propriedades do sistema de 3 GDL

Grau de Liberdade	Massa (m_i) em kg	Rigidez (k_i) em N/m	Amortecimento viscoso (c_i) em Ns/m	Força de atrito (F_{a_i}) em N	Deslocamento inicial (x_i) em m	Velocidade inicial (m/s)
1	103017.33	4,04e8	0	3e5	0,08	0
2	103017.33	2,89e8	0	2,5e5	0,10	0
3	103017.33	1,85e8	0	2e5	0,12	0

Na Figura 6.6 é ilustrada a comparação da resposta em termos do deslocamento, obtida pelo método numérico desenvolvido com um intervalo de integração de $1e-5$ segundos e o método analítico, para cada grau de liberdade do sistema de três graus de liberdade em vibração livre.

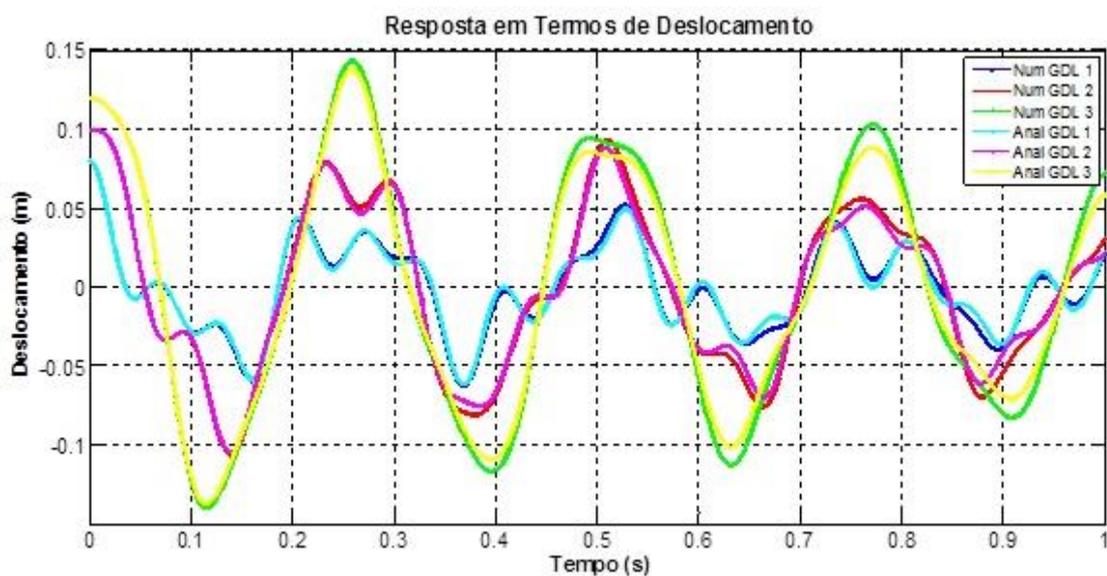


Figura 6.6 - Comparação da resposta do método analítico com o método numérico do sistema de três graus de liberdade.

Como são observadas, as respostas de cada grau de liberdade obtidas pelos dois métodos estão sobrepostas, concluindo-se, assim, que o método numérico desenvolvido está correto.

6.4 Estruturas analisadas

As estruturas estudadas no presente trabalho são dois edifícios metálicos, de nove e dezesseis pavimentos, os quais são representados pelos pórticos das figuras 6.7 e 6.8. As dimensões mostradas nas figuras estão dadas em metros.

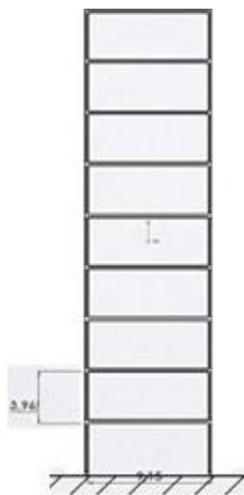


Figura 6.7 - Edifício metálico de nove pavimentos

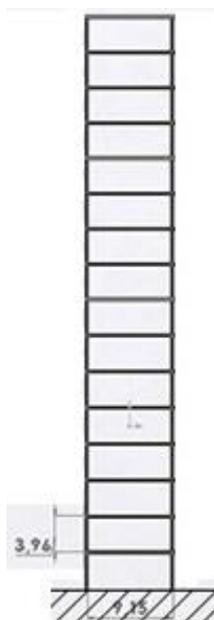


Figura 6.8 - Edifício metálico de dezesseis pavimentos

Para fins de simplificação, uma forma aproximada de obter a resposta é representar as estruturas analisadas como sistemas discretos de n GDL com massas concentradas, tipo *shear building*. O edifício de nove pavimentos foi discretizado como

uma estrutura de 9 GDL enquanto o edifício de dezesseis pavimentos foi discretizado como uma estrutura de 16 GDL, conforme mostra a Figura 6.9. As propriedades das estruturas são dadas nas tabelas 6.2 e 6.3.

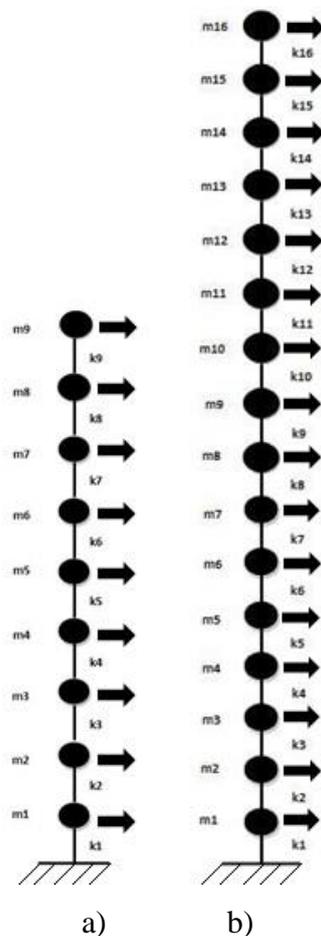


Figura 6.9 - Os Pórticos Discretizados. a) Estrutura de nove pavimentos. b) Estrutura de dezesseis pavimentos.

Tabela 6.2 - Propriedades da estrutura de nove pavimentos

Pavimento	Massa (m_i) em kg	Rigidez (k_i) em N/m
1	103017,33	9,89E8
2	103017,33	9,89E8
3	103017,33	7,90E8
4	103017,33	7,90E8
5	103017,33	7,90E8
6	103017,33	7,90E8
7	103017,33	4,04E8
8	103017,33	2,89E8
9	103017,33	1,85E8

Fonte: Adaptada de Albermani *et al.*, 2012

Tabela 6.3 - Propriedades da estrutura de dezesseis pavimentos

Pavimento	Massa (m_i) em kg	Rigidez (k_i) em N/m
1	685321,10	2,56E8
2	579408,77	2,56E8
3	579408,77	2,56E8
4	579408,77	2,56E8
5	579408,77	2,56E8
6	579408,77	2,56E8
7	579408,77	2,56E8
8	579408,77	2,56E8
9	579408,77	2,56E8
10	579408,77	2,56E8
11	579408,77	2,56E8
12	579408,77	2,56E8
13	579408,77	2,56E8
14	566666,67	1,74E8
15	566666,67	1,74E8
16	566666,67	1,74E8

Fonte: Adaptada de Rama Mohan Rao A. e Sivasubramanian, 2007.

Inicialmente, determinaram-se as frequências naturais das estruturas, parâmetro importante para determinar o intervalo de tempo crítico Δt_{cr} , como explicado na Seção 6.1, e assim escolher o intervalo de integração Δt que deve ser menor que o crítico para que a estabilidade do método das Diferenças Finitas seja assegurada.

A Tabela 6.4 lista as frequências naturais da estrutura de 9 pavimentos, enquanto a Tabela 6.5 mostra as frequências naturais para o edifício de 16 andares.

Tabela 6.4 - Frequências naturais do edifício de 9 pavimentos

Frequências Naturais (Hz)								
f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9
2.2595	5.3478	8.8937	11.6456	14.7212	17.6922	22.0784	25.8164	27.9858

Tabela 6.5 - Frequências naturais do edifício de 16 pavimentos

Frequências Naturais (Hz)							
f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
0.3185	0.9280	1.4962	2.0736	2.6595	3.1989	3.6665	4.1310
f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}	f_{16}
4.6024	4.9825	5.2672	5.6338	5.9925	6.2902	6.5105	6.6454

Para ilustrar o procedimento de otimização proposto, escolhem-se como força de excitação para as duas estruturas analisadas dois registros sísmicos reais. O sismo ocorrido em Cauçete, província de San Juan, Argentina, em 1977 e o sismo El Centro, ocorrido no sudeste da Califórnia na fronteira dos Estados Unidos e México em 1940. A Figura 6.10 apresenta o registro do sismo de Cauçete, enquanto a Figura 6.11 mostra o registro do sismo El Centro.

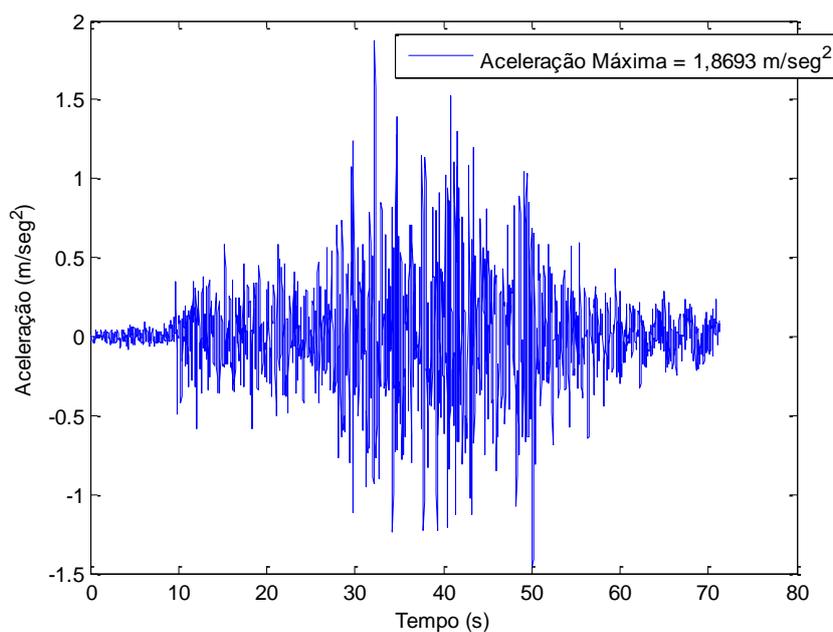


Figura 6.10 - O Sismo de Cauçete

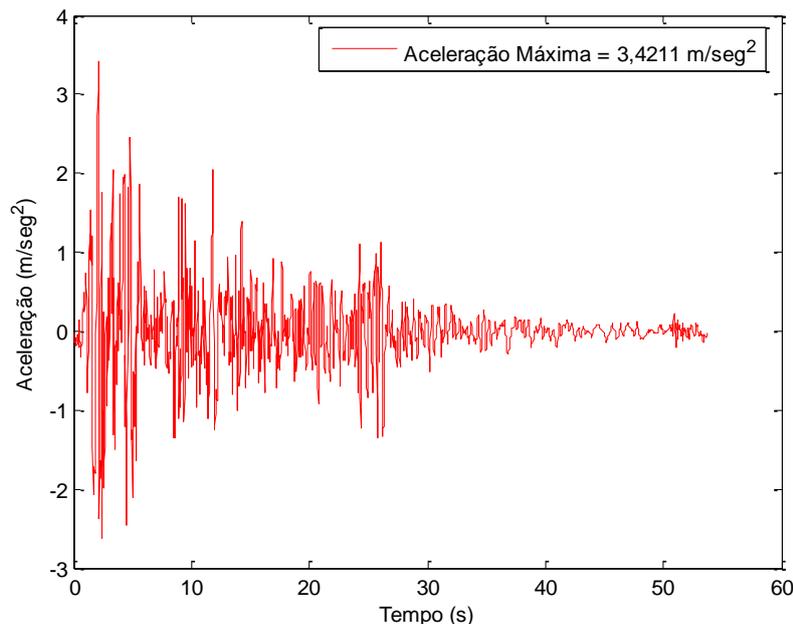


Figura 6.11 - O Sismo El Centro

Primeiramente, determina-se a resposta dinâmica dos dois edifícios estudados sem dissipadores de energia externos, apenas com seu amortecimento próprio de 0,5% como elemento de referência e, em uma segunda análise, obtém-se a resposta dos edifícios após a instalação dos amortecedores por atrito nos locais ótimos e com as forças de atrito ótimas. Para esta finalidade foram desenvolvidos programas computacionais em *Matlab* e implementado o *Firefly Algorithm*.

Os parâmetros de entrada do *Firefly Algorithm* foram os mesmos em todos os casos estudados. Esses valores são: número de *fireflies* $n = 10$, $\alpha = 0.5$, $\beta_{min} = 0.2$, $\gamma = 1$.

6.5 Otimização dos amortecedores das estruturas

Nesta seção apresentam-se os resultados da otimização simultânea das forças e posições dos amortecedores por atrito das duas estruturas apresentadas na Seção 6.4, submetidas aos dois registros sísmicos (movimento horizontal da base) apresentados nas figuras 6.10 e 6.11.

O objetivo da otimização é reduzir o deslocamento máximo da estrutura, o qual ocorre no topo do edifício. A resposta dinâmica das estruturas foi determinada a partir do algoritmo de *Diferenças Finitas* desenvolvido no presente trabalho, enquanto a

otimização foi realizada mediante a implementação do *Firefly Algorithm*. Entrando, com o número máximo de amortecedores de vibração por atrito e com os limites inferior e superior das forças de atrito de cada amortecedor, o *Firefly Algorithm* encontra a melhor posição desses amortecedores na estrutura juntamente com suas forças de atrito ótimas. A seguir apresentam-se as análises para as duas estruturas estudadas submetidas aos dois registros sísmicos apresentados.

6.5.1 Edifício de nove pavimentos

Neste primeiro caso de estudo, o número máximo de posições possíveis é nove (um em cada andar), enquanto o número máximo de amortecedores de vibração por atrito adotado para otimizar a sua localização na estrutura e força de atrito de forma simultânea é quatro. Para realizar a otimização simultânea foram implementadas quatro variáveis de projeto tipo discreta (posições) e nove variáveis de projeto tipo contínua (forças). No caso das variáveis de projeto discretas, os limites inferior e superior destacam os andares da estrutura. Para o caso das variáveis do tipo contínuas, os limites inferior e superior são as forças de atrito. Os limites adotados para a força de atrito são 400kN - 1100kN para o sismo de Cauçete e 1400kN - 2000kN para o sismo El Centro. Com este número de amortecedores nos locais ótimos, a resposta da estrutura diminui em aproximadamente 70% para o sismo de Cauçete e em torno de 50% para o sismo El Centro, como será apresentado a seguir. Com objetivo de confirmar a robustez do método proposto foram realizadas quatro simulações para cada caso. Também foi avaliada a resposta com diferente número de iterações. A seguir são apresentados os resultados para uma simulação com 1000 iterações e depois para uma simulação com 5000 iterações, inicialmente para o sismo de Cauçete e posteriormente para o sismo El Centro.

No Apêndice A são apresentados mais três resultados das simulações com 1000 e 5000 iterações para o sismo de Cauçete, enquanto no Apêndice B se apresentam mais três resultados das simulações com 1000 e 5000 iterações para o sismo El Centro.

Resultados para o sismo de Caucete:

Na Tabela 6.6 são apresentados os resultados dos locais e as forças de atrito ótimas dos amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela 6.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Caucete com 1000 iterações

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1068,2
2	840,58
7	785,86
8	1075,6

Na Figura 6.12 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

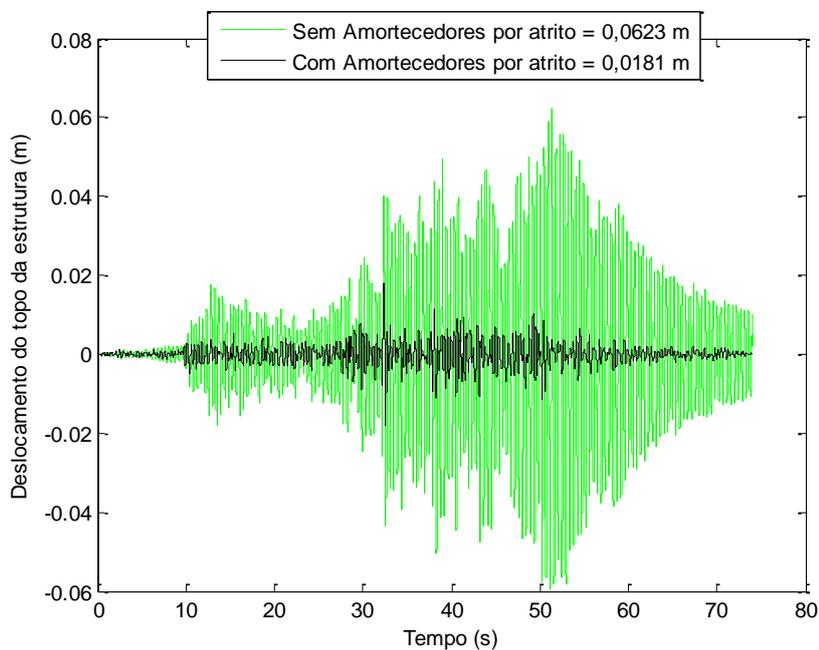


Figura 6.12 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Caucete com 1000 iterações

Na Figura 6.13 é possível ver a resposta em termos dos deslocamentos por andar da estrutura quando não há amortecedor externo e após a instalação dos 4 amortecedores otimizados, com 1000 iterações.

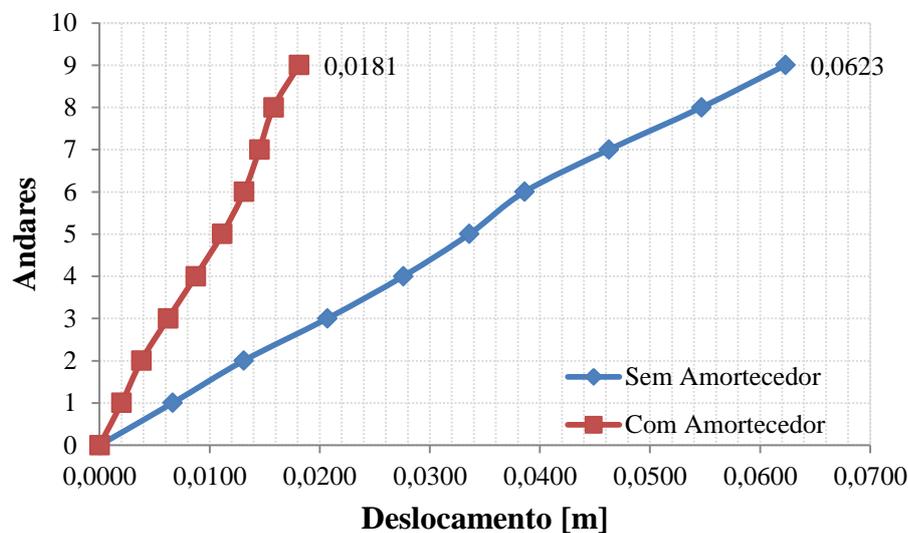


Figura 6.13 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

Na Tabela 6.7 são apresentados os deslocamentos por andar sem amortecedores externos e com os 4 amortecedores por atrito após a otimização simultânea da localização e força de atrito destes dispositivos.

Tabela 6.7 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

Andar	Deslocamento Sem Amortecedor [m]	Deslocamento Com Amortecedor [m]	Redução [%]
1	0,0066	0,0020	69,80
2	0,0131	0,0038	70,99
3	0,0207	0,0062	69,93
4	0,0276	0,0087	68,35
5	0,0336	0,0111	66,84
6	0,0386	0,0131	66,00
7	0,0463	0,0145	68,63
8	0,0547	0,0158	71,10
9	0,0623	0,0181	70,91

Mais três simulações deste caso são apresentadas no Apêndice A.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para uma simulação com 5000 iterações. No Apêndice A encontram-se mais resultados referentes às demais simulações realizadas com 5000 iterações, assim como o resultado da comparação entre o deslocamento com os amortecedores com as forças e locações ótimas e o deslocamento com os amortecedores com as forças ótimas e em outros locais deferentes.

Na Tabela 6.8 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela 6.8 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1072,00
2	868,17
3	850,00
8	729,10

Na Figura 6.14 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

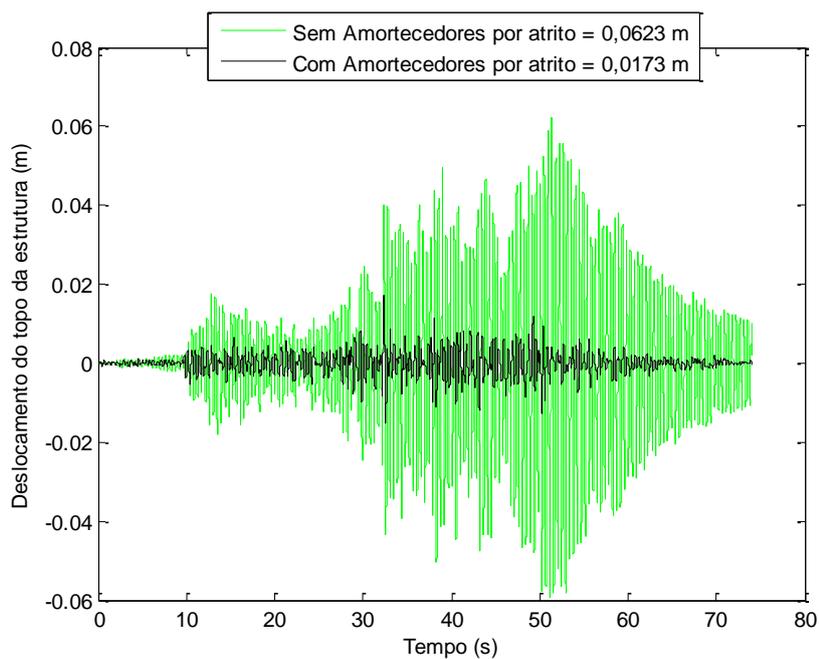


Figura 6.14 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

Na Figura 6.15 é possível ver a resposta em termos dos deslocamentos por andar da estrutura quando não há amortecedor externo e após a instalação dos 4 amortecedores otimizados, com 5000 iterações.

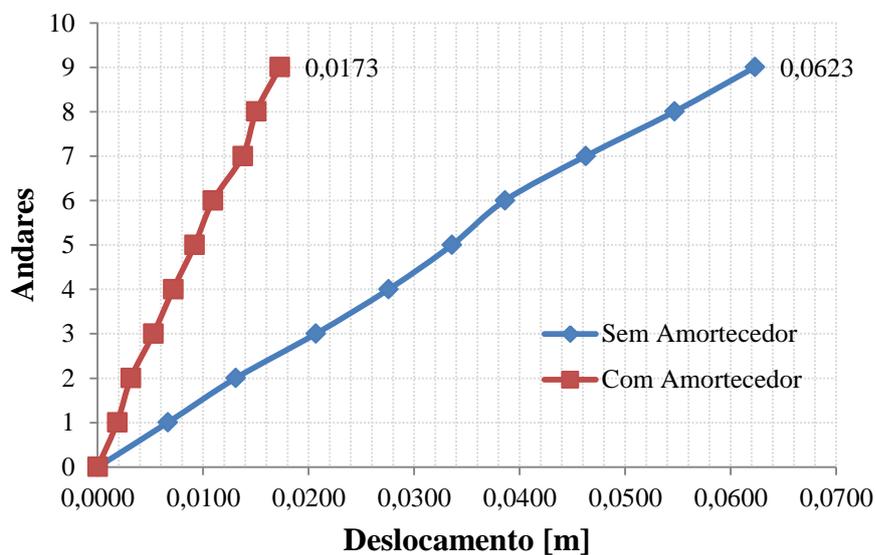


Figura 6.15 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

Na Tabela 6.9 são apresentados os deslocamentos por andar sem amortecedores externos e com os 4 amortecedores por atrito após a otimização simultânea da localização e força de atrito destes dispositivos.

Tabela 6.9 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

Andar	Deslocamento Sem Amortecedor [m]	Deslocamento Com Amortecedor [m]	Redução [%]
1	0,0066	0,0019	72,11
2	0,0131	0,0031	75,93
3	0,0207	0,0053	74,47
4	0,0276	0,0072	74,05
5	0,0336	0,0092	72,64
6	0,0386	0,0109	71,68
7	0,0463	0,0137	70,30
8	0,0547	0,0150	72,50
9	0,0623	0,0173	72,27

Os resultados estatísticos de quatro simulações independentes, para os dois diferentes números de iterações, são apresentados na Tabela 6.10, mostrando um pequeno desvio padrão em relação ao valor médio, o que confirma a robustez do método proposto.

Tabela 6.10 - Resultados estatísticos para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete, para 4 simulações independentes

Número de iterações	Deslocamento médio (m)	Redução média (%)	Desvio padrão (m)	Coefficiente de variação (%)
1000	0,0182	70,78	5,909e-4	3,25
5000	0,0177	71,59	4,2426e-4	2,40

A Figura 6.16 mostra a curva de convergência do deslocamento máximo no topo da estrutura para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete.

Prédio de 9 andares submetido ao sismo de Caucete

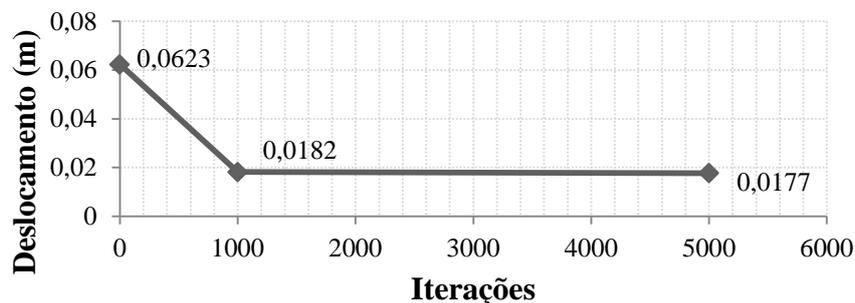


Figura 6.16 - Curva de convergência para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete

Como se observa na Figura 6.16, o deslocamento máximo no topo da estrutura diminuiu um pouco quando se aumentou o número de iterações de 1000 para 5000. Entretanto, esta redução não foi significativa, o que não justifica o uso de 5000 iterações, porque com 1000 iterações o tempo computacional é de 24 horas e com 5000 é de 36 horas, assim o aumento no custo computacional é muito elevado, frente a uma pequena melhora na resposta em termos de deslocamento máximo no topo.

Resultados para o sismo El Centro:

Agora, o mesmo edifício de nove pavimentos é novamente analisado com 1000 e 5000 iterações, porém submetido ao sismo El Centro.

Na Tabela 6.11 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela 6.11 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
2	1880,7
3	1751,9
7	1934,6
8	1901,0

Na Figura 6.17 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

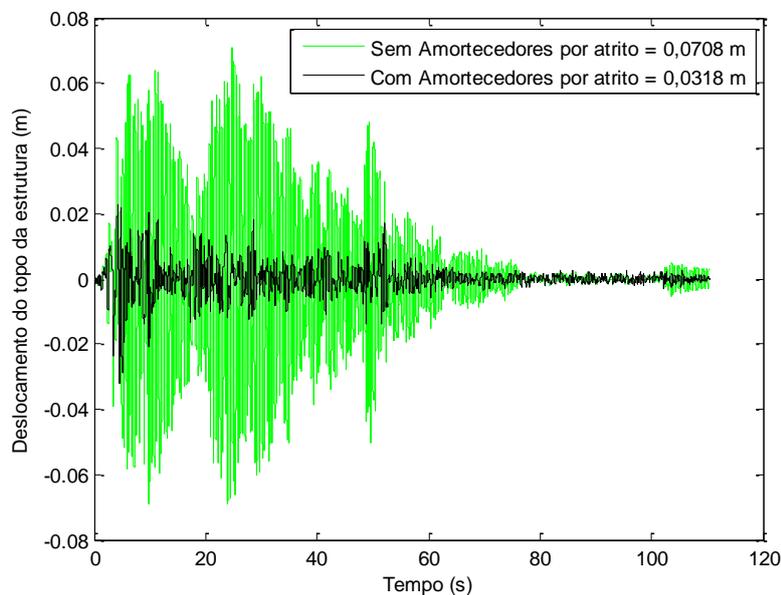


Figura 6.17 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações

Na Figura 6.18 é possível ver a resposta em termos dos deslocamentos por andar da estrutura quando não há amortecedor externo e após a instalação dos 4 amortecedores otimizados, com 1000 iterações.

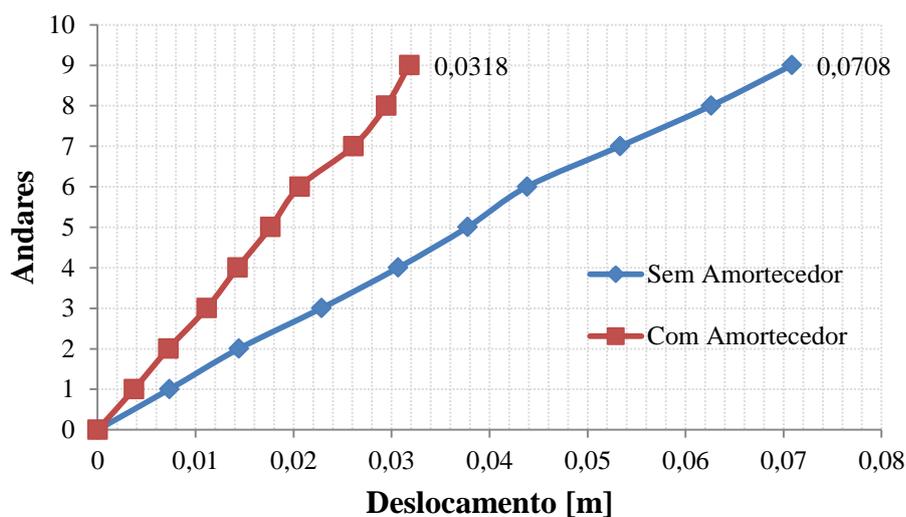


Figura 6.18 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações

Na Tabela 6.12 são apresentados os deslocamentos por andar sem amortecedores externos e com os 4 amortecedores por atrito após a otimização simultânea da localização e força de atrito destes dispositivos.

Tabela 6.12 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações

Andar	Deslocamento Sem Amortecedor [m]	Deslocamento Com Amortecedor [m]	Redução [%]
1	0,0073	0,0037	49,35
2	0,0144	0,0072	49,89
3	0,0228	0,0111	51,26
4	0,0307	0,0143	53,40
5	0,0377	0,0176	53,24
6	0,0438	0,0206	52,98
7	0,0533	0,0261	51,03
8	0,0626	0,0294	52,96
9	0,0708	0,0318	55,10

Mais três simulações deste caso são apresentadas no Apêndice B.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para uma simulação com 5000 iterações. No Apêndice B encontram-se mais resultados referentes às demais simulações realizadas com 5000 iterações, assim como o resultado da comparação entre o deslocamento com os amortecedores com as forças e locações ótimas e o deslocamento com os amortecedores com as forças ótimas e em outros locais deferentes.

Na Tabela 6.13 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela 6.13 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1903,8
7	1581,4
8	1637,1
9	1469,6

Na Figura 6.19 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

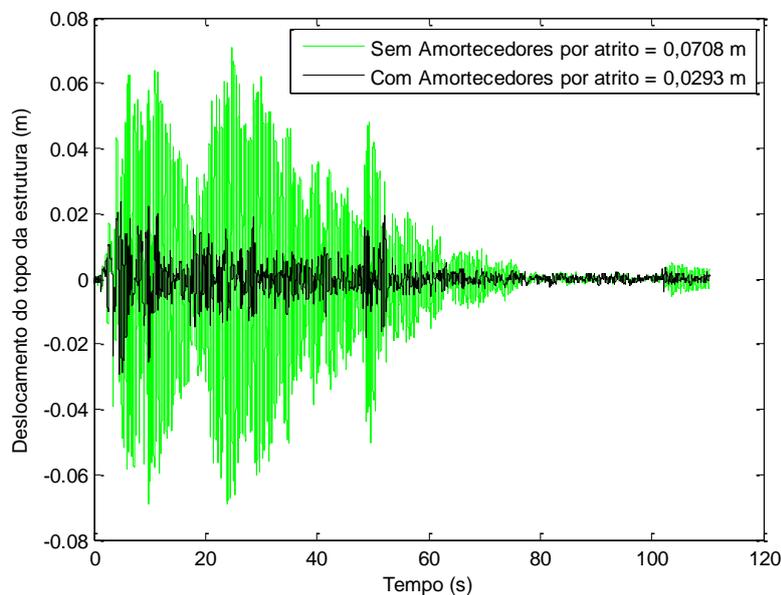


Figura 6.19 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações

Na Figura 6.20 é possível ver a resposta em termos dos deslocamentos por andar da estrutura quando não há amortecedor externo e após a instalação dos 4 amortecedores otimizados, com 5000 iterações.

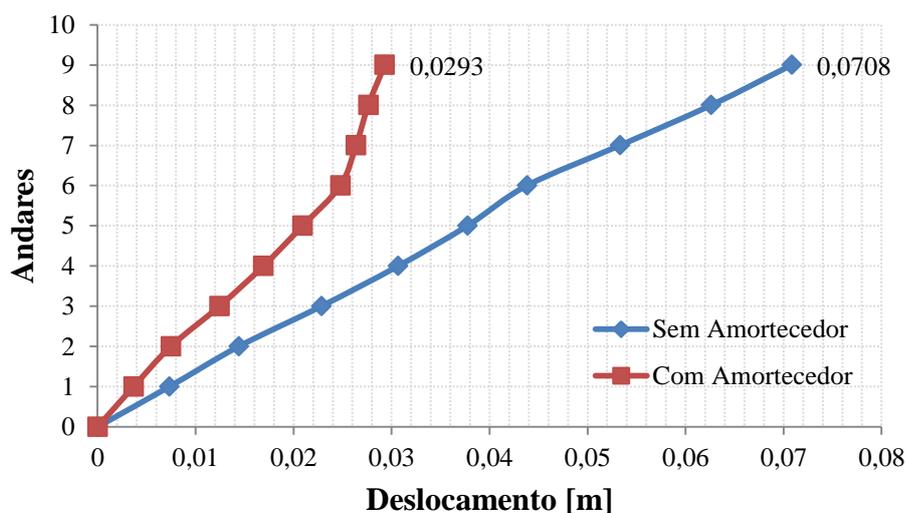


Figura 6.20 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações

Na Tabela 6.14 são apresentados os deslocamentos por andar sem amortecedores externos e com os 4 amortecedores por atrito após a otimização simultânea da localização e força de atrito destes dispositivos.

Tabela 6.14 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações

Andar	Deslocamento Sem Amortecedor [m]	Deslocamento Com Amortecedor [m]	Redução [%]
1	0,0073	0,0037	49,84
2	0,0144	0,0075	48,14
3	0,0228	0,0124	45,55
4	0,0307	0,0169	44,84
5	0,0377	0,0209	44,55
6	0,0438	0,0248	43,46
7	0,0533	0,0264	50,52
8	0,0626	0,0276	55,87
9	0,0708	0,0293	58,63

Os resultados estatísticos de quatro simulações independentes, para os dois diferentes números de iterações, são apresentados na Tabela 6.15, mostrando um pequeno desvio padrão em relação ao valor médio, o que confirma a robustez do método proposto.

Tabela 6.15 - Resultados estatísticos para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro, para 4 simulações independentes

Número de iterações	Deslocamento médio (m)	Redução média (%)	Desvio padrão (m)	Coefficiente de variação (%)
1000	0,0307	56,64	7,6757e-4	2,50
5000	0,0312	55,93	0,0016	4,97

A Figura 6.21 mostra a curva de convergência do deslocamento máximo no topo da estrutura para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro.

Prédio de 9 andares submetido ao sismo El Centro

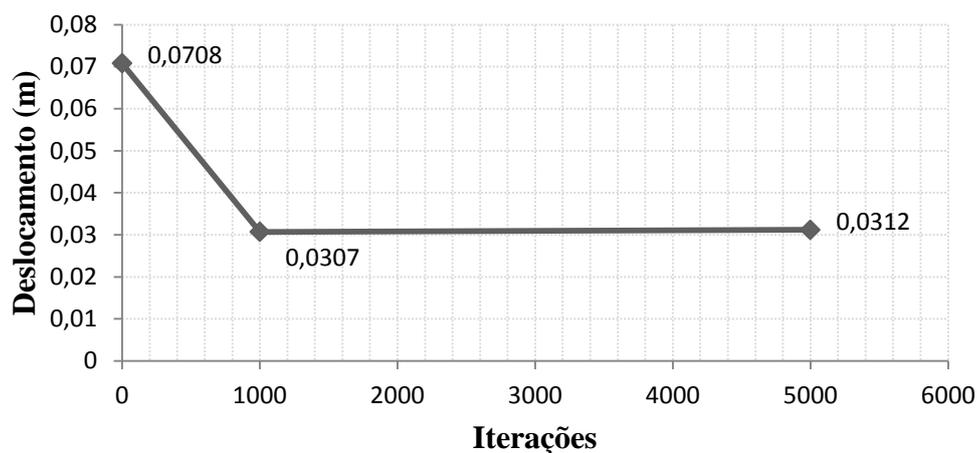


Figura 6.21 - Curva de convergência para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro

Como se observa na Figura 6.21, o deslocamento máximo no topo da estrutura se manteve aproximadamente constante quando se aumentou o número de iterações de 1000 para 5000, por isso não se justifica o uso de 5000 iterações, porque com 1000 iterações o tempo computacional é de 21 horas e com 5000 é de 32 horas, assim o aumento no custo computacional é muito elevado, sem, entretanto melhorar a resposta em termos de deslocamento máximo no topo.

6.5.2 Edifício de dezesseis pavimentos

Neste caso de estudo o número máximo de posições possíveis é dezesseis (um em cada andar), enquanto o número máximo de amortecedores de vibração por atrito adotado para otimizar a sua localização na estrutura e força de atrito de forma simultânea é seis. Para realizar a otimização simultânea foram implementadas seis variáveis de projeto tipo discreta (posições) e dezesseis variáveis de projeto tipo contínua (forças). No caso das variáveis de projeto discretas os limites inferior e superior destacam os andares da estrutura. Para o caso das variáveis do tipo contínuas, os limites inferior e superior são as forças de atrito. Os limites da força de atrito são 500kN - 1000kN para o sismo de Caucete e 1200kN - 1800kN para o sismo El Centro. Com este número de amortecedores nos locais ótimos a resposta da estrutura diminuiu em aproximadamente 45% para o sismo de Caucete e em torno de 35% para o sismo El

Centro, como será apresentado a seguir. Com objetivo de confirmar a robustez do método proposto foram realizadas quatro simulações para cada caso. Também foi avaliada a resposta com diferente número de iterações. A seguir são apresentados os resultados para uma simulação com 1000 iterações e depois para uma simulação com 5000 iterações, inicialmente para o sismo de Cauçete e posteriormente para o sismo El Centro.

No Apêndice C são apresentados mais três resultados das simulações com 1000 e 5000 iterações para o sismo de Cauçete, enquanto no Apêndice D se apresentam mais três resultados das simulações com 1000 e 5000 iterações para o sismo El Centro.

Resultados para o sismo de Cauçete:

Na Tabela 6.16, são apresentados os resultados dos locais e as forças de atrito ótimas dos amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela 6.16 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	961,80
2	973,37
4	788,61
5	932,68
6	699,80
11	831,08

Na Figura 6.22 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados com 1000 iterações.

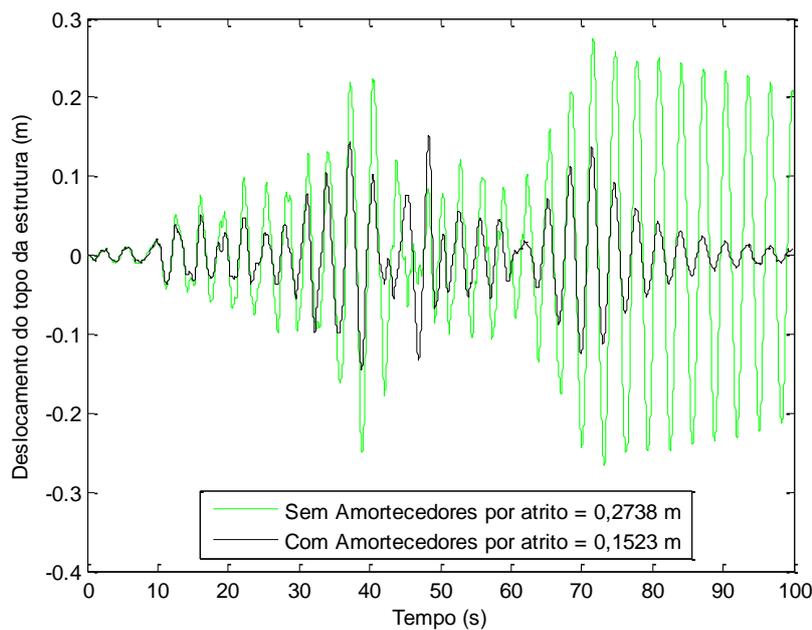


Figura 6.22 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Caucete com 1000 iterações

Na Figura 6.23 é possível ver a resposta em termos dos deslocamentos por andar da estrutura quando não há amortecedor externo e após a instalação dos 6 amortecedores otimizados, com 1000 iterações.

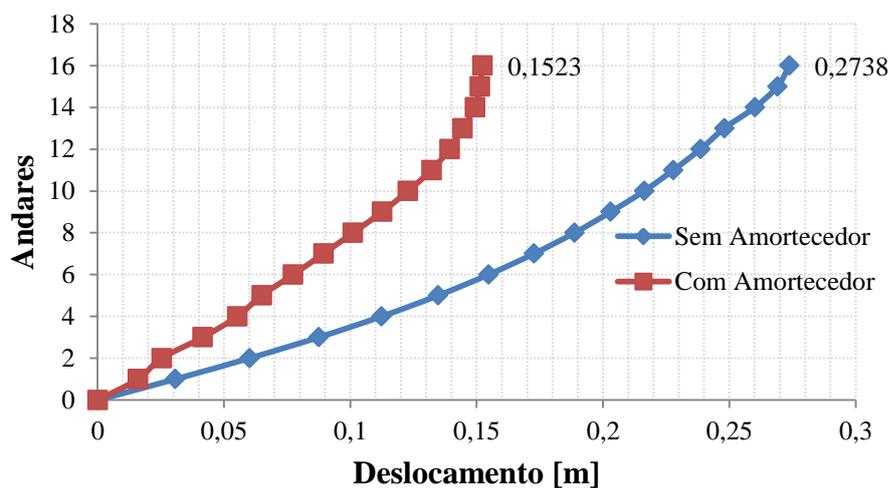


Figura 6.23 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Caucete com 1000 iterações

Na Tabela 6.17 são apresentados os deslocamentos por andar sem amortecedores externos e com os 6 amortecedores por atrito após a otimização simultânea da localização e força de atrito destes dispositivos.

Tabela 6.17 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

Andar	Deslocamento Sem Amortecedor [m]	Deslocamento Com Amortecedor [m]	Redução [%]
1	0,0307	0,0159	48,26
2	0,0601	0,0253	57,83
3	0,0875	0,0416	52,48
4	0,1124	0,0553	50,80
5	0,1347	0,0649	51,79
6	0,1547	0,0773	50,01
7	0,1726	0,0894	48,23
8	0,1887	0,1010	46,47
9	0,2030	0,1126	44,54
10	0,2163	0,1228	43,23
11	0,2278	0,1322	41,99
12	0,2386	0,1393	41,62
13	0,2480	0,1444	41,77
14	0,2601	0,1493	42,58
15	0,2690	0,1513	43,77
16	0,2738	0,1523	44,37

Mais três simulações deste caso são apresentadas no Apêndice C.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para uma simulação com 5000 iterações. No Apêndice C encontram-se mais resultados referentes às demais simulações realizadas com 5000 iterações, assim como o resultado da comparação entre o deslocamento com os amortecedores com as forças e locações ótimas e o deslocamento com os amortecedores com as forças ótimas e em outros locais deferentes.

Na Tabela 6.18 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela 6.18 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	813,55
4	730,03
5	796,61
6	703,31
7	936,99
8	696,44

Na Figura 6.24 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

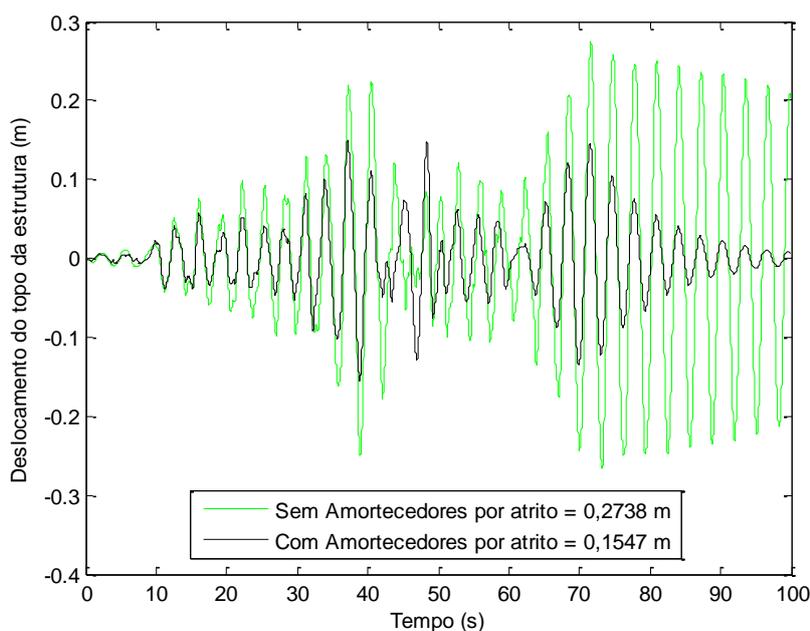


Figura 6.24 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

Na Figura 6.25 é possível ver a resposta em termos dos deslocamentos por andar da estrutura quando não há amortecedor externo e após a instalação dos 6 amortecedores otimizados, com 5000 iterações.

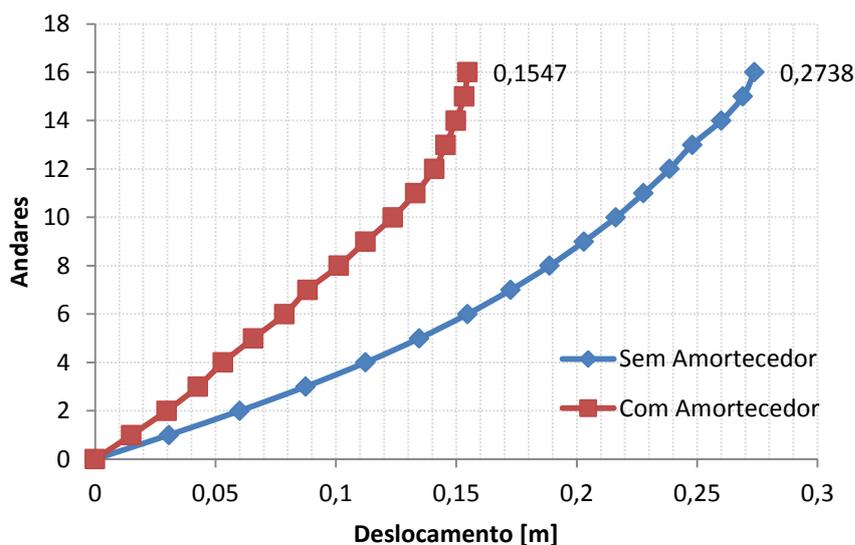


Figura 6.25 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

Na Tabela 6.19 são apresentados os deslocamentos por andar sem amortecedores externos e com os 6 amortecedores por atrito após a otimização simultânea da localização e força de atrito destes dispositivos.

Tabela 6.19 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

Andar	Deslocamento Sem Amortecedor [m]	Deslocamento Com Amortecedor [m]	Redução [%]
1	0,0307	0,0159	48,26
2	0,0601	0,0253	57,83
3	0,0875	0,0416	52,48
4	0,1124	0,0553	50,80
5	0,1347	0,0649	51,79
6	0,1547	0,0773	50,01
7	0,1726	0,0894	48,23
8	0,1887	0,1010	46,47
9	0,2030	0,1126	44,54
10	0,2163	0,1228	43,23
11	0,2278	0,1322	41,99
12	0,2386	0,1393	41,62
13	0,2480	0,1444	41,77
14	0,2601	0,1493	42,58

15	0,2690	0,1513	43,77
16	0,2738	0,1523	44,37

Os resultados estatísticos de quatro simulações independentes, para os dois diferentes números de iterações, são apresentados na Tabela 6.20, mostrando um pequeno desvio padrão em relação ao valor médio, o que confirma a robustez do método proposto.

Tabela 6.20 - Resultados estatísticos para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete, para 4 simulações independentes

Número de iterações	Deslocamento médio (m)	Redução média (%)	Desvio padrão (m)	Coefficiente de variação (%)
1000	0,1502	45,14	0,0018	1,17
5000	0,1580	42,29	0,0029	1,81

A Figura 6.26 mostra a curva de convergência do deslocamento máximo no topo da estrutura para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete.

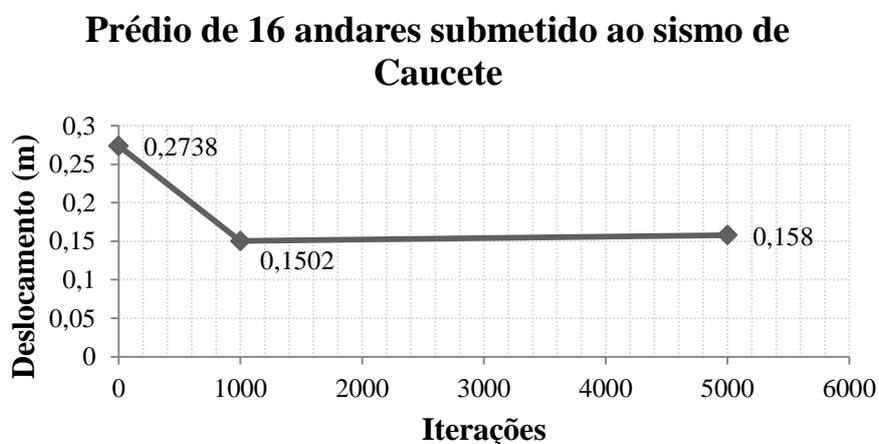


Figura 6.26 - Curva de convergência para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete

Como se observa na Figura 6.26, o deslocamento máximo no topo da estrutura se manteve aproximadamente constante quando se aumentou o número de iterações de 1000 para 5000, por isso não se justifica o uso de 5000 iterações, porque com 1000 iterações o tempo computacional é de 19 horas e com 5000 é de 31 horas, assim o

aumento no custo computacional é muito elevado, sem, entretanto melhorar a resposta em termos de deslocamento máximo no topo.

Resultados para o sismo El Centro:

Agora o mesmo edifício de dezesseis pavimentos é novamente analisado com 1000 e 5000 iterações, porém submetido ao sismo El Centro.

Na Tabela 6.21 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela 6.21 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1741,9
2	1717,8
3	1597,2
10	1363,4
11	1714,8
14	1557,5

Na Figura 6.27, apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

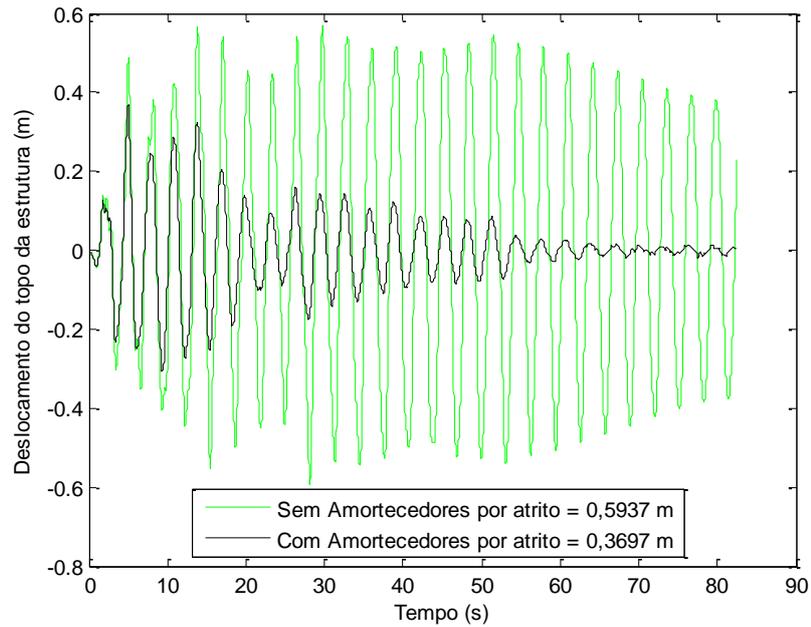


Figura 6.27 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações

Na Figura 6.28 é possível ver a resposta em termos dos deslocamentos por andar da estrutura quando não há amortecedor externo e após a instalação dos 6 amortecedores otimizados, com 1000 iterações.

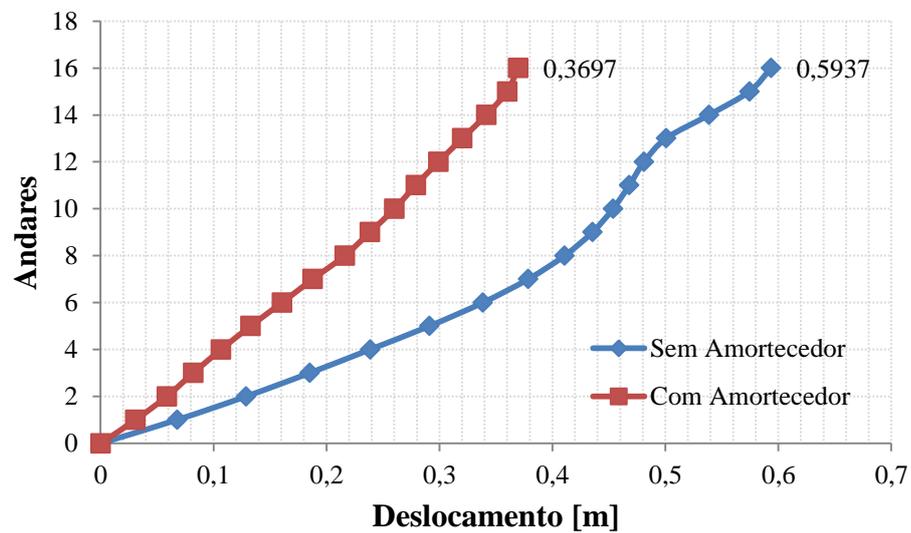


Figura 6.28 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações

Na Tabela 6.22 são apresentados os deslocamentos por andar sem amortecedores externos e com os 6 amortecedores por atrito após a otimização simultânea da localização e força de atrito destes dispositivos.

Tabela 6.22 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 1000 iterações

Andar	Deslocamento Sem Amortecedor [m]	Deslocamento Com Amortecedor [m]	Redução [%]
1	0,0677	0,0309	54,37
2	0,1289	0,0587	54,48
3	0,1852	0,0820	55,71
4	0,2386	0,1067	55,28
5	0,2912	0,1328	54,38
6	0,3385	0,1606	52,54
7	0,3786	0,1878	50,40
8	0,4108	0,2162	47,37
9	0,4354	0,2384	45,24
10	0,4537	0,2602	42,65
11	0,4681	0,2790	40,39
12	0,4812	0,2992	37,83
13	0,5006	0,3203	36,03
14	0,5386	0,3415	36,60
15	0,5744	0,3600	37,33
16	0,5937	0,3697	37,73

Mais três simulações deste caso são apresentadas no Apêndice D.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para uma simulação com 5000 iterações. No Apêndice D encontram-se mais resultados referentes às demais simulações realizadas com 5000 iterações, assim como o resultado da comparação entre o deslocamento com os amortecedores com as forças e locações ótimas e o deslocamento com os amortecedores com as forças ótimas e em outros locais deferentes.

Na Tabela 6.23 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela 6.23 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	1308,1
4	1388,0
9	1769,3
10	1257,3
11	1642,1
14	1593,4

Na Figura 6.29 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

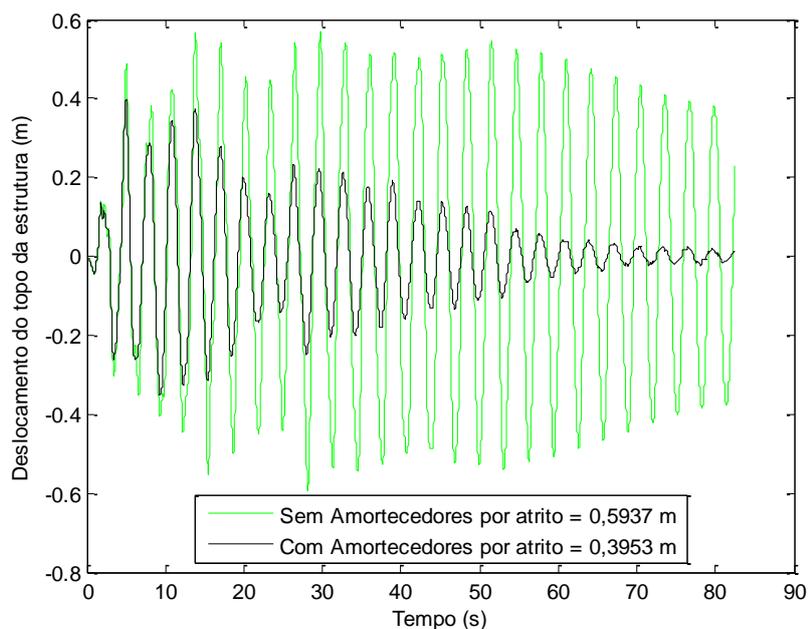


Figura 6.29 - Resposta em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações

Na Figura 6.30 é possível ver a resposta em termos dos deslocamentos por andar da estrutura quando não há amortecedor externo e após a instalação dos 6 amortecedores otimizados, com 5000 iterações.

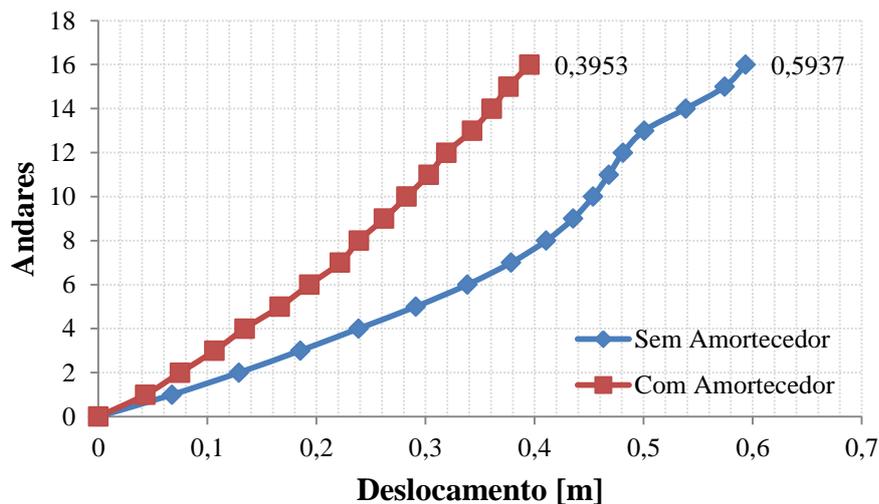


Figura 6.30 - Resposta em termos de deslocamentos por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações

Na Tabela 6.24 são apresentados os deslocamentos por andar sem amortecedores externos e com os 6 amortecedores por atrito após a otimização simultânea da localização e força de atrito destes dispositivos.

Tabela 6.24 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento por andar para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro com 5000 iterações

Andar	Deslocamento Sem Amortecedor [m]	Deslocamento Com Amortecedor [m]	Redução [%]
1	0,0677	0,0432	36,26
2	0,1289	0,0749	41,91
3	0,1852	0,1067	42,40
4	0,2386	0,1342	43,76
5	0,2912	0,1665	42,81
6	0,3385	0,1935	42,83
7	0,3786	0,2217	41,46
8	0,4108	0,2390	41,82
9	0,4354	0,2621	39,81
10	0,4537	0,2827	37,68
11	0,4681	0,3029	35,28
12	0,4812	0,3192	33,67
13	0,5006	0,3427	31,54
14	0,5386	0,3607	33,04
15	0,5744	0,3762	34,51
16	0,5937	0,3953	33,42

Os resultados estatísticos de quatro simulações independentes, para os dois diferentes números de iterações, são apresentados na Tabela 6.25, mostrando um pequeno desvio padrão em relação ao valor médio, o que confirma a robustez do método proposto.

Tabela 6.25 - Resultados estatísticos para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro, para 4 simulações independentes

Número de iterações	Deslocamento médio (m)	Redução média (%)	Desvio padrão (m)	Coefficiente de variação (%)
1000	0,3685	37,93	0,0089	2,42
5000	0,3926	33,87	0,0091	2,33

A Figura 6.31 mostra a curva de convergência do deslocamento máximo no topo da estrutura para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro.

Prédio de 16 andares submetido ao sismo El Centro

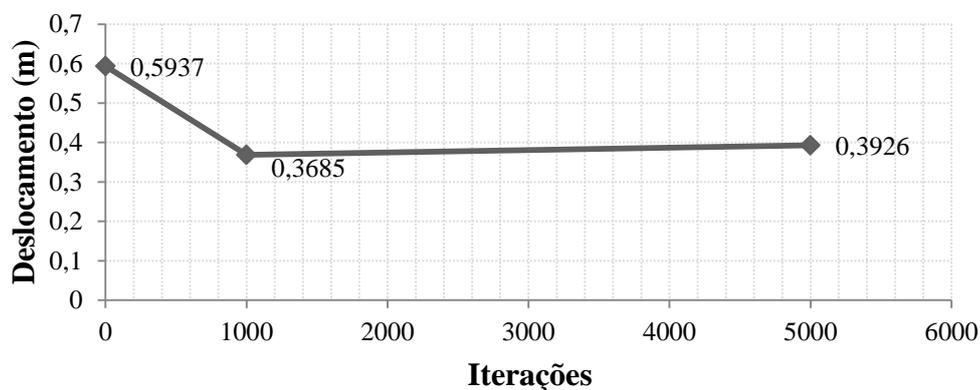


Figura 6.31 - Curva de convergência para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro

Como se observa na Figura 6.31, o deslocamento máximo no topo da estrutura aumentou um pouco quando se aumentou o número de iterações de 1000 para 5000, por isso não se justifica o uso de 5000 iterações, porque com 1000 iterações o tempo computacional é de 17 horas e com 5000 é de 29 horas, assim o aumento no custo computacional é muito elevado, sem, entretanto melhorar a resposta em termos de deslocamento máximo no topo.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 Conclusões finais

De acordo com o apresentado nos capítulos anteriores, a otimização de amortecedores utilizando algoritmos meta-heurísticos é uma área relativamente nova, e hoje em dia, é um dos campos do conhecimento mais explorados, pois existe a necessidade de enfrentar novos desafios como projetar estruturas mais seguras em localizações com alta atividade sísmica.

Com isso, neste trabalho, foi proposto um método para otimizar simultaneamente a posição e a força de amortecedores por atrito em estruturas submetidas a excitações sísmicas. Para realizar a otimização foi implementado um dos mais modernos algoritmos meta-heurísticos, o *Firefly Algorithm* (FA) o qual permite lidar com problemas de otimização de variáveis mistas.

Inicialmente fez-se uma validação do programa computacional desenvolvido para determinar a resposta dinâmica de estruturas com amortecimento por atrito comparando-o com a solução analítica para um sistema simples de um grau de liberdade. Com isso pôde-se comprovar que o programa elaborado apresentou resultados praticamente idênticos aos da solução analítica, validando o programa desenvolvido.

Com o objetivo de comprovar a eficácia da metodologia de otimização simultânea proposta neste trabalho, o método foi aplicado para otimizar simultaneamente a posição e a força de amortecedores por atrito em dois edifícios metálicos de nove e dezesseis pavimentos submetidos aos registros sísmicos de Cauçete e El Centro.

Através das simulações numéricas apresentadas e com base nos resultados obtidos, pôde-se concluir que para todos os casos estudados a metodologia proposta se mostrou muito efetiva na redução da resposta dinâmica, chegando a reduções de mais de 70%, e em um pior caso alcançaram-se reduções da ordem de 30%, o qual é um valor consideravelmente bom.

As 4 simulações independentes realizadas para cada um dos casos estudados mostram que o método proposto é robusto, apresentando coeficientes de variação na faixa entre 1% e 5%.

Portanto, acredita-se que o método proposto poderá ser utilizado como uma ferramenta útil para auxiliar no projeto de amortecedores por atrito.

Finalmente, cabe destacar que na literatura não existem estudos de otimização simultânea com este tipo de amortecedor, o que comprova o caráter inovador do presente trabalho.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar a otimização simultânea da posição e das forças de atrito em estruturas similares as apresentadas nesta dissertação, considerando outras funções objetivo, como por exemplo, a redução do cisalhamento na base ou da aceleração no topo.
- Utilizando o algoritmo meta-heurístico *Firefly Algorithm*, realizar a otimização do local e das forças dos amortecedores por atrito em outros tipos de estruturas, como treliças, por exemplo, e submetidas a outros tipos de carregamentos externos.
- Considerar os problemas mencionados anteriormente e realizar a otimização multi-objetivo, na qual as funções objetivo podem ser a minimização da resposta da estrutura em termos do deslocamento e também em termos da aceleração no topo da estrutura, por exemplo.
- Realizar a otimização simultânea da posição e força de amortecedores por atrito considerando restrições de confiabilidade ou na presença de incertezas.
- Considerar a excitação sísmica através de um espectro, como Kanai-Tajimi, por exemplo (Miguel *et al.*, 2014).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balazic, J., Guruswamy, G., Elliot, J., Pall, R., & Pall, A. (2000). Seismic rehabilitation of Justice Headquarters Building Ottawa, Canada. Twelfth World Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-8). Auckland: Pall Dynamique.

Cha, Y.-J., Agrawal, A. K., Kim, Y., & Raich, A. M. (2012). Multi-objective genetic algorithms for cost-effective distributions of actuators and sensors in large structures. *Expert Systems with Applications*, 7822-7833.

Chandra, R., Masand, M., Nandi, S., Tripathi, C., Pall, R., & Pall, A. (2000). Friction-dampers for seismic control of La Gardenia towers south city, Gurgaon, India. Twelfth World Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-8). Auckland: Pall Dynamique.

Chang, C., Pall, A., & Louie, J. (2006). The use of friction damper for seismic retrofit of the Monterey County Government Center. 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-10). San Francisco: Pall Dynamique.

Chen, G., & Wu, J. (2001). Optimal placement of multiple tune mass dampers for seismic structures. *Journal of Structural Engineering*, 1054-1062.

Cheung, M., Naumoski, N., & Foo, S. (2000). Research and application of seismic retrofit technologies in Canada. *Public Works and Government Service Canada*, 1-20.

Choi, H., & Kim, J. (2010). New installation scheme for viscoelastic dampers using cables. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1201-1211.

Chopra, A. K. (2002). *Dynamic of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.

Cimellaro, G. P. (2007). Simultaneous stiffness-damping optimization of structures with respect to acceleration, displacement and base shear. *Engineering Structures*, 2853-2870.

De la Cruz, S. T., López-Almansa, F., & Oller, S. (2007). Numerical simulation of the seismic behavior of building structures equipped with friction energy dissipators. *Computers and Structures*, 30-42.

Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K., & Carlson, J. D. (1998). An experimental study of MR dampers for seismic protection. *Smart Master Struct.*, 693-703.

Elnashai, Amr S.; Di Sarno, Luigi. (2008). *Fundamentals of earthquake engineering*. Chichester: Wiley.

Fang, J., Wang, Q., Wang, S., & Wang, Q. (2012). Min-max criterion to the optimal design of vibration absorber in a system with Coulomb friction and viscous damping. *Nonlinear Dynamics*, 393-400.

Filiatrault, A., & Cherry, S. (1987). Performance evaluation of friction damped braced steel frames under earthquake loads. *Earthquake Spectra*, 57-78.

Fu, C. (2011). Active TLCGD control of plane asymmetric buildings under earthquake excitation. *Acta Mech. Sin.*, 817-822.

Fu, Y., & Cherry, S. (2000). Design of friction damped structures using lateral force procedure. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 989-1010.

Guo, X., & Jiang, J. (2011). Optimization of actuator placement in a truss-cored sandwich plate with independent modal space control. *Smart Materials and Structures*, 1-12.

Jangid, R. S., & Bhaskararao, A. V. (2006). Seismic analysis of structures connected with friction dampers. *Engineering Structures*, 690-703.

Kim, H.-S., & Kang, J.-W. (2012). Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic-algorithm. *Engineering Structures*, 242-257.

Li, Q. S., Yang, Y. L., & Liu, D. K. (2003). Optimum positioning of actuators in tall buildings using genetic algorithm. *Computers and Structures*, 2823-2827.

Liao, W.-I., Mualla, I., & Loh, C.-H. (2004). Shaking-table test of a friction-damped frame structure. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 45-54.

López-Almansa, F., de la Cruz, S. T., & Taylor, C. (2011). Experimental study of friction dissipators for seismic protection of building structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 475-486.

Mahendra P., S., & Moreschi, L. (2001). Optimal seismic response control with dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 553-572.

Malhotra, A., Carson, D., Gopal, P., Braimah, A., Di Giovanni, G., & Pall, R. (2004). Friction dampers for seismic upgrade of S.T. Vincent Hospital, Ottawa. 13th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-10). Vancouver: Pall Dynamique.

Marano, G. C., Greco, R., Trentadue, F., & Chiaia, B. (2007). Constrained reliability-based optimization of linear tuned mass dampers for seismic control. *International Journal of Solids and Structures*, 7370-7388.

Marano, G. C., Trentadue, F., & Greco, R. (2007). Stochastic optimum design criterion for linear damper devices for seismic protection of buildings. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 441-455.

Marko, J., Thambiratnam, D., & Perera, N. (2004). Influence of damping systems on building structures subject to seismic effects. *Engineering Structures*, 1939-1956.

Miguel, L. F. F.; Lopez, R. H.; Miguel, L. F. F.;. (2013). Multimodal size, shape, and topology optimization of truss structures using the Firefly algorithm. *Advances in Engineering Software*, 23-37.

Miguel, L. F. F.; Miguel, L. F. F.; Lopez, R. H.;. (2014). Robust Design Optimization of Friction Dampers for Structural Response Control. *Structural Control and Health Monitoring*. DOI: 10.1002/stc.1642

Min, K.-W., Moon, B.-W., Lee, S.-H., Park, J.-H., Lee, S.-K., & Kim, J. (2008). Design of bracing-friction damper system for seismic retrofitting. *Smart Structures and Systems*, 685-696.

Mohebbi, M., Shakeri, K., Ghanbarpour, Y., & Majzoub, H. (2012). Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms for mitigating the seismic response of structures. *Journal of Vibration and Control*, 1-21.

Moreschi, L. M., & Singh, M. P. (2003). Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance. *Earthquake and Engineering and Structural Dynamics*, 1291-1311.

Mostaghel, N., & Davis, A. T. (1997). Representations of Coulomb friction for dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 541-548.

Mousavi, S. A., & Ghorbani-Tanha, A. K. (2012). Optimum placement and characteristics of velocity-dependent dampers under seismic excitation. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 403-414.

Movaffaghi, H., & Friberg, O. (2006). Optimal placement of dampers in structures using genetic algorithm. *Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, 597-606.

Mualla, I. H., & Belev, B. (2002). Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. *Engineering Structures*, 365-371.

Pall, A., & Pall, R. T. (2004). Performance-based design using Pall Friction Dampers an economical design solution. *13th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1-15). Vancouver: Pall Dynamique.

Pasquin, C., Leboeuf, N., & Pall, T. (2002). Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton's Building, Montreal. 4th Structural Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering (pp. 1-10). Montreal: Pall Dynamique.

Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P., & Chatupote, P. (2003). Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures. *Engineering Structures*, 39-46.

Pong, W. S., Chen, B.-J., Tsai, C. S., & Chiang, T. C. (2004). Interactive behavior of structures with multiple friction pendulum isolation system and unbounded foundations. *Advances in Structural Engineering*, 539-551.

Qu, J. T., & Yang, W. L. (2011). Numerical investigation of effectiveness of two seismic dampers on a benchmark structure. *Journal of Physics: Conference Series*, 1-10.

Rai, N. K., Reddy, G. R., Ramanujam, S., Venkatraj, V., & Agrawal, P. (2009). Seismic Response Control Systems for Structures. *Defence Science Journal*, 239-251.

Rakicevic, Z. T., Bogdanovic, A., Jurukovski, D., & Nawrotzki, P. (2012). Effectiveness of tune mass damper in the reduction of the seismic response of the structure. *Bull Earthquake Eng.*, 1049-1073.

Rama Mohan Rao, A., & Sivasubramanian, K. (2008). Optimal placement of actuators for active vibration control of seismic excited tall buildings using a multiple start guided neighbourhood search (MSGNS) algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, 133-159.

Roik, K., Dorka, U., & Dechent, P. (1988). Vibration control of structures under earthquake loading by three-stage friction-grip elements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 501-521.

Scholl, R. E. (1990). Improving the earthquake performance of structures with added damping and stiffness elements. Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering , (pp. 489-498). Palm Springs.

Seong, J. Y., Min, K. W., & Kim, J. C. (2012). Analytical investigation of an SDOF building structure equipped with a friction damper. *Nonlinear Dyn*, 217-229.

Sgobba, S., & Marano, G. C. (2010). Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behaviour. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1739-1755.

Shao, D., Pall, A., & Soli, B. (2006). Friction damper for seismic upgrade of a 14-story patient tower with a 36-foot tall soft-story. 8th US National Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-10). San Francisco: Pall Dynamique.

Shoushtari, A. V. (2010). Seismic behavior of tall building structures by friction damper. Johor: Universiti Teknologi Malaysia.

Singh, M. P., & Moreschi, L. M. (2001). Optimal seismic response control with dampers . *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 553-572.

Sobczyk, M. R., Perondi, E. A., & B. Cunha, M. A. (2012). A Continuous Extension of the LuGre Friction Model with Application to the Control of a Pneumatic Servo Positioner. 51st IEEE Conference on Decision and Control (pp. 3544-3550). Maui: IEEE.

Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. Buffalo: John Wiley & Sons.

Swanson, D., Falkin, B., Yamatsuka, K., & Campell, D. (2004). Use of friction dampers on elevated waters tanks. 13th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-12). Vancouver: Pall Dynamique.

Takewaki, I., Tsuji, M., Yoshitomi, S., & Adachi, F. (2013). Nonlinear optimal oil damper design in seismically controlled multi-story building frame. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* , 1-13.

Tan, X., & Rogers, R. J. (1995). Equivalent Viscous Damping Models of Coulomb Friction in Multi-degree of Freedom Vibration Systems. *Journal of Sound and Vibration*, 33-50.

Vaseghi, J., Navaei, S., Navayinia, B., & Roshantabari, F. (2009). A parametric assessment of friction damper in eccentric braced frame. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 208-212.

Verganelakis, V., & Pall, R. T. (2004). HIGHTECH SEISMIC DESIGN OF LE NOUVEL EUROPA, MONTREAL. 13th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-9). Vancouver: Pall Dynamique.

Vezina, S., & Pall, R. (2004). Seismic retrofit of MUCTC building using friction dampers, Palais Des Congres, Montreal. 13th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-11). Vancouver : Pall Dynamique.

Walsh, K. K., Cronin, K. J., Rambo-Roddenberry, M. D., & Grupenhof, K. (2012). Dynamic analysis of seismically excited flexible truss tower with scissor-jack dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 723-745.

Wilson, C. M., & Abdullah, M. M. (2010). Structural vibration reduction using self-tuning fuzzy control of magnetorheological dampers. *Bull Earthquake Eng.*, 1037-1054.

Xu, Y. L., Qu, W. L., & Chen, Z. H. (2001). Control of wind-excited truss tower using semiactive friction damper. *Journal of Structural Engineering* , 861-868.

Xu, Y., Qu, W. L., & Chen, Z. H. (2001). Dynamic analysis of wind-excited truss tower with friction dampers. *Computers and Structures*, 2817-2831.

Yang, X.-S. (2010). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*. Cambridge: Luniver Press.

Yang, X.-S. (2011). *Metaheuristic Optimizatio: Algorithm Analysis and Open Problems*. 10th International Symposium on Experimental Algorithms (pp. 21-32). Chania: Lecture Notes in Computer Sciences.

APÊNDICE A - Resultados das simulações para o prédio de nove andares com o sismo de Cauçete

No apêndice A estão os resultados de mais 6 simulações, sendo 3 com 1000 iterações e 3 com 5000 iterações, para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete.

A.1 Simulações com 1000 iterações

- Simulação 2: Na Tabela A.1 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela A.1 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 2

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	915,77
4	896,60
7	873,58
8	860,73

Na Figura A.1 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

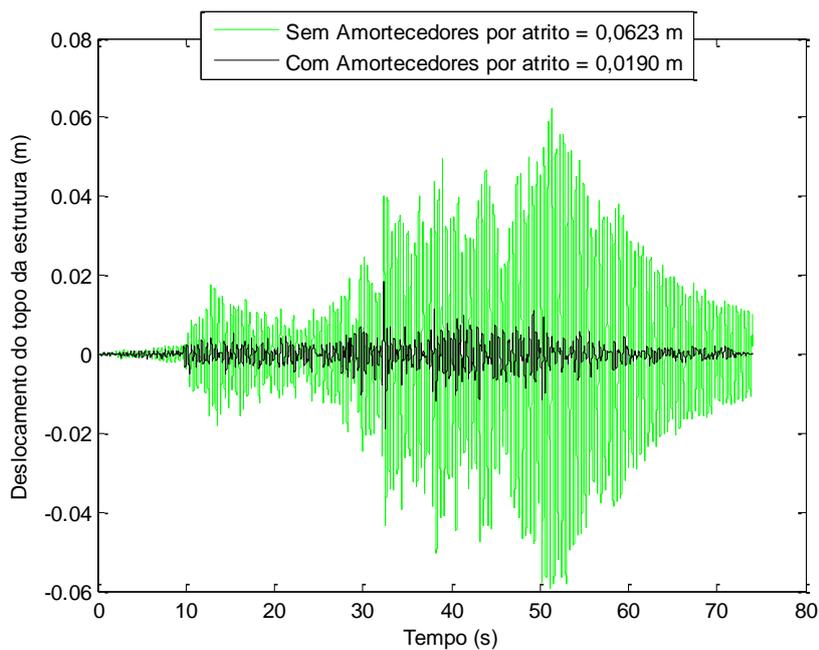


Figura A.1 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

- Simulação 3: Na Tabela A.2 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela A.2 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 3

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1023,9
3	828,64
8	944,93
9	642,24

Na Figura A.2 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

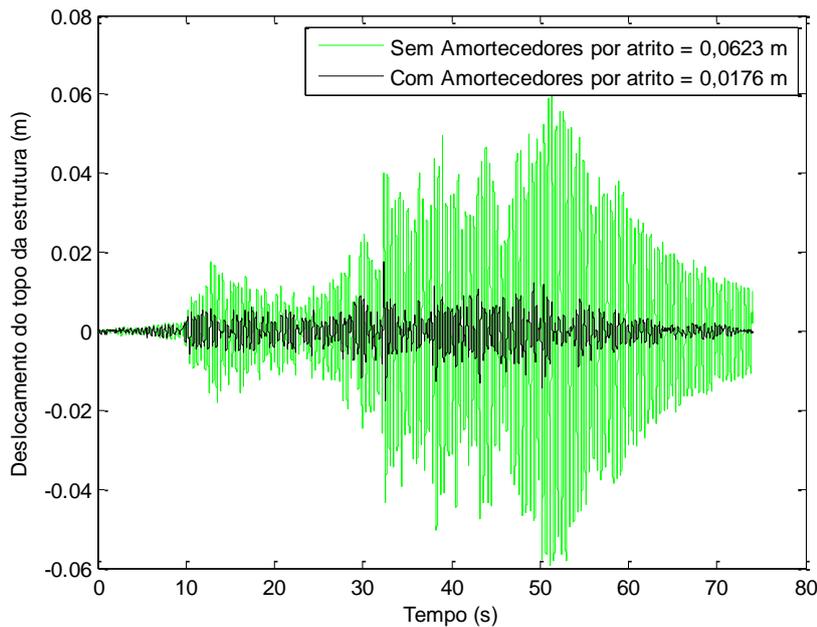


Figura A.2 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

- Simulação 4: Na Tabela A.3 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela A.3 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 4

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	955,55
2	755,65
3	949,23
8	713,72

Na Figura A.3 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

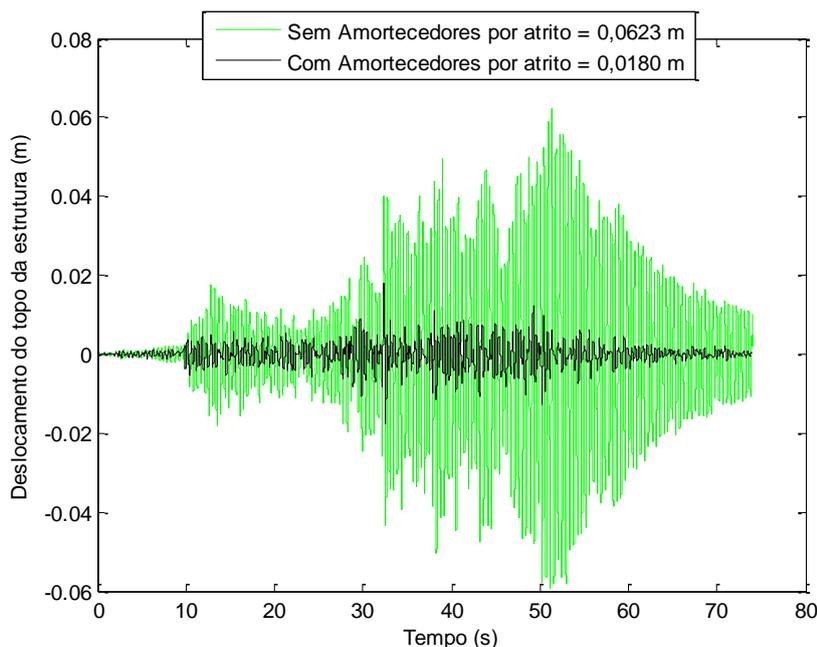


Figura A.3 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

A.2 Simulações com 5000 iterações

- Simulação 2: Na Tabela A.4 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela A.4 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 2

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1065,40
3	824,04
8	768,23
9	506,26

Na Figura A.4 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

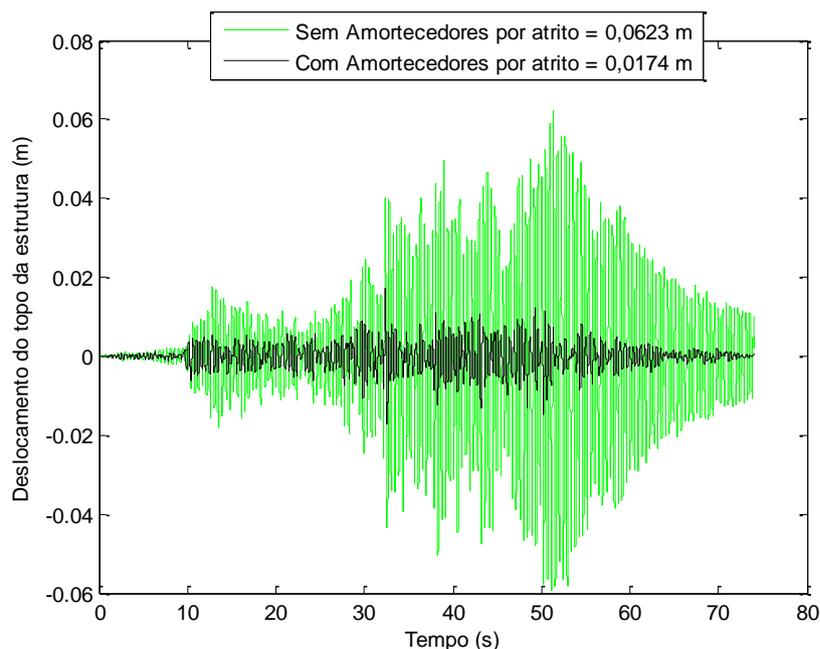


Figura A.4 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

- Simulação 3: Na Tabela A.5 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela A.5 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 3

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1064,80
2	1057,7
3	979,20
8	736,42

Na Figura A.5 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

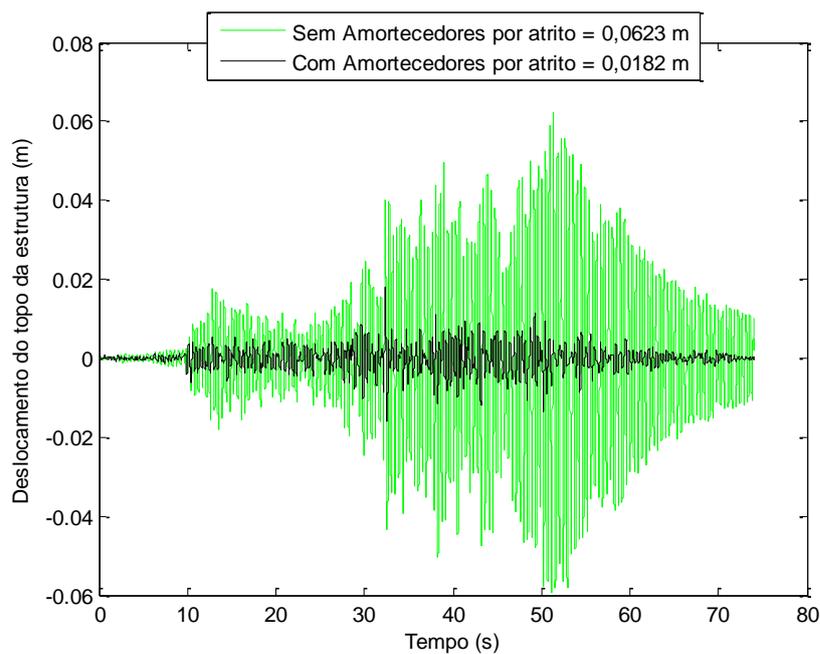


Figura A.5 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

- Simulação 4: Na Tabela A.6 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela A.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 4

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1091,2
2	985,28
3	988,11
8	692,53

Na Figura A.6 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

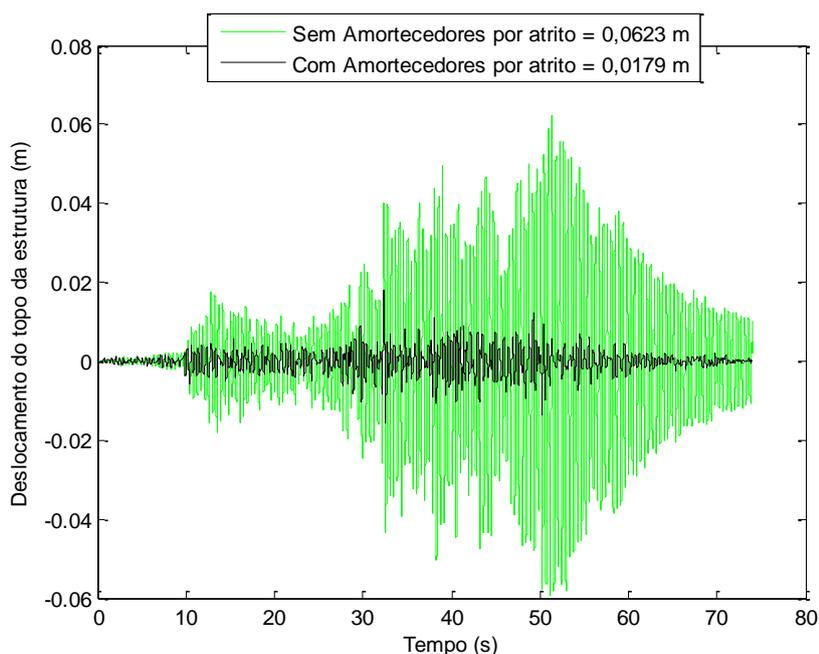


Figura A.6 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de Caucete com 5000 iterações

A.3 Comparação do deslocamento com os amortecedores em locais diferentes aos ótimos no Edifício de 9 andares submetido ao sismo Caucete

Nestas análises, os amortecedores com as forças otimizadas foram posicionados em locais diferentes aos ótimos para comparar a resposta com o deslocamento obtido após a otimização simultânea das forças e posições dos dispositivos. Na Tabela A.7 são apresentadas as forças ótimas em locais diferentes aos ótimos.

Tabela A.7 – Forças otimizadas e posições dos amortecedores de atrito

Pavimentos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
4	1068,2
6	840,58
8	785,86
9	1075,6

Como se observa na Figura A.7, a melhor resposta em termos do deslocamento é obtida com os dispositivos nos locais ótimos.

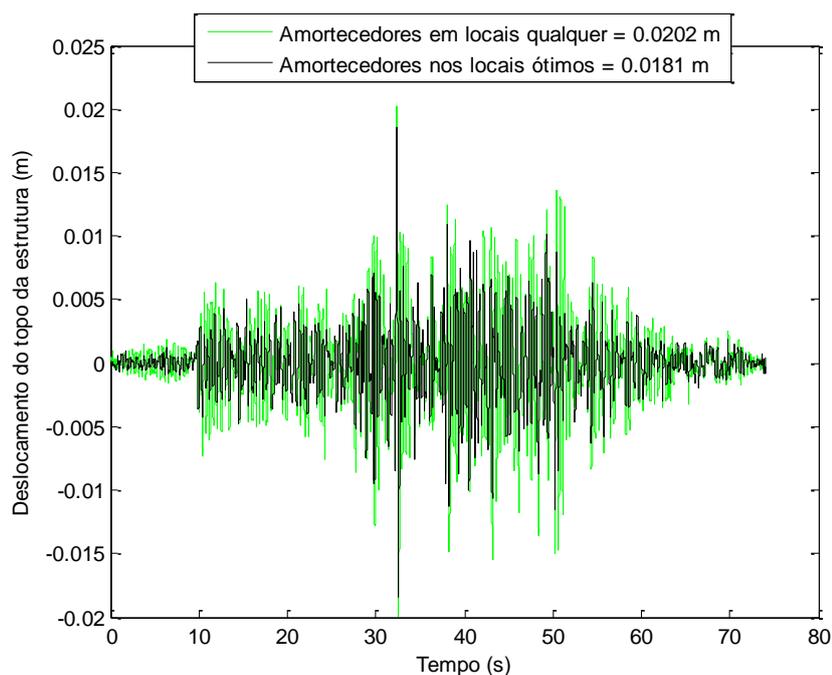


Figura A.7 – Comparação dos deslocamentos do Edifício de 9 andares submetido ao sismo Caucete com os amortecedores nos locais ótimos e em locais quaisquer.

APÊNDICE B - Resultados das simulações para o prédio de nove andares com o sismo El Centro

No apêndice B estão resultados de mais 6 simulações, sendo 3 com 1000 iterações e 3 com 5000 iterações, para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo El Centro.

B.1 Simulações com 1000 iterações

- Simulação 2: Na Tabela B.1 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela B.1 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 2

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1999,4
3	1593,8
8	1479,6
9	1764,7

Na Figura B.1 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

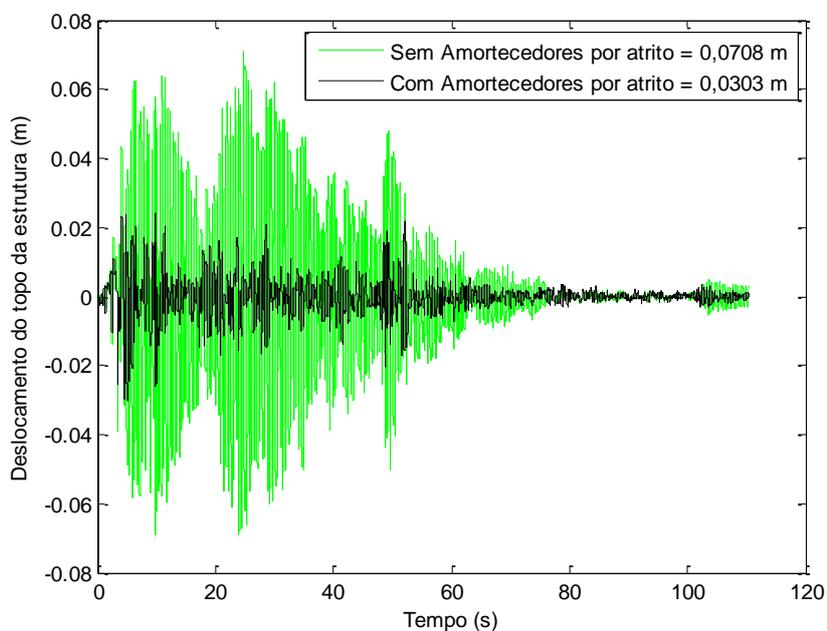


Figura B.1 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações

- Simulação 3: Na Tabela B.2 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela B.2 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 3

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
2	1762,0
3	1910,1
8	1675,1
9	1847,3

Na Figura B.2 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

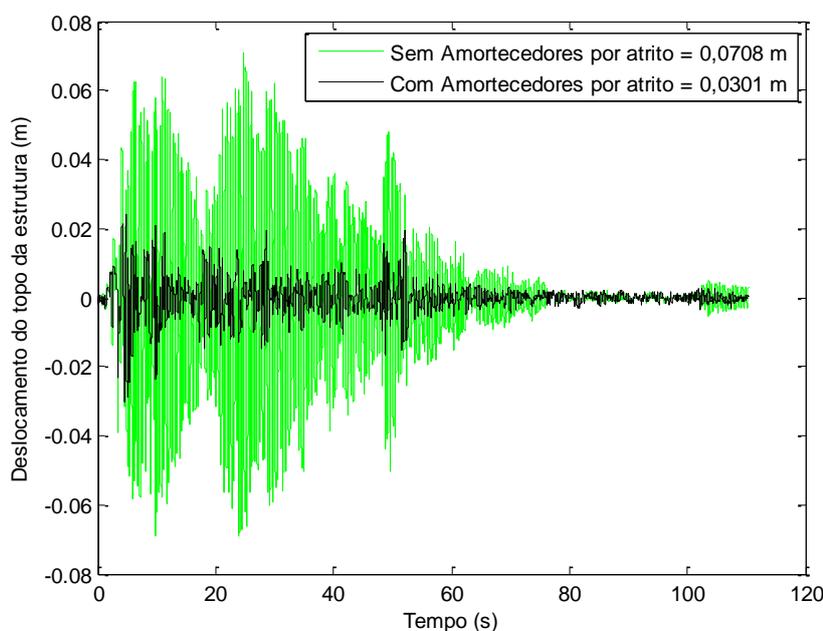


Figura B.2 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações

- Simulação 4: Na Tabela B.3 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela B.3 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 4

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1444,7
7	1547,9
8	1677,5
9	1664,2

Na Figura B.3 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

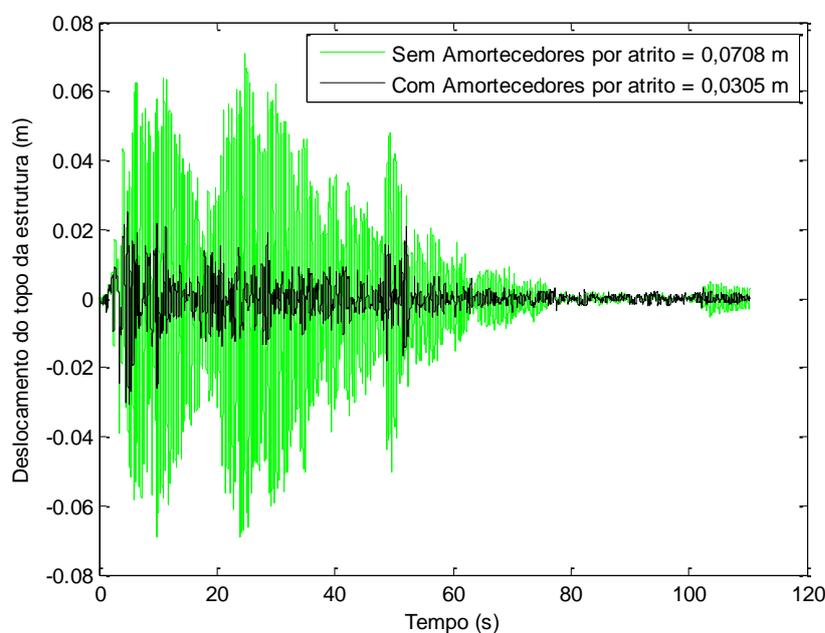


Figura B.3 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações

B.2 Simulações com 5000 iterações

- Simulação 2: Na Tabela B.4 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela B.4 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 2

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1941,6
3	1411,4
7	1590,3
8	1828,8

Na Figura B.4 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

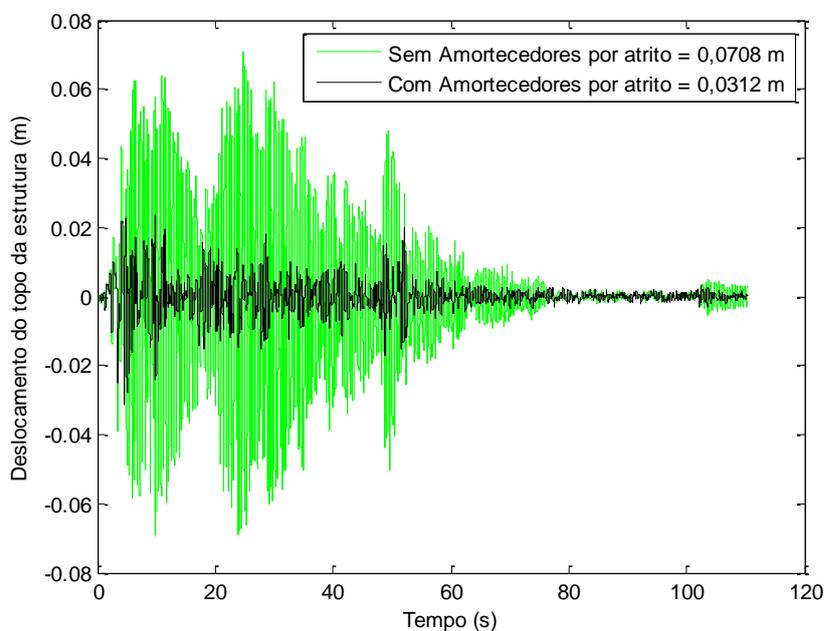


Figura B.4 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações

- Simulação 3: Na Tabela B.5 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela B.5 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 3

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	2000
3	1480,9
7	1767,2
8	1701,1

Na Figura B.5 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

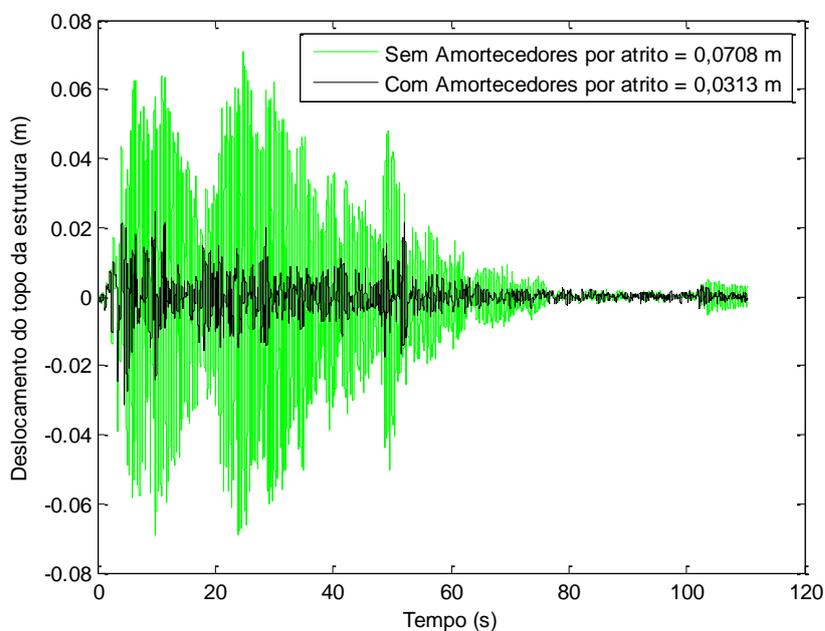


Figura B.5 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações

- Simulação 4: Na Tabela B.6 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 4 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela B.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 4

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1720,7
3	1724,7
7	1632,5
8	1464,4

Na Figura B.6 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 4 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

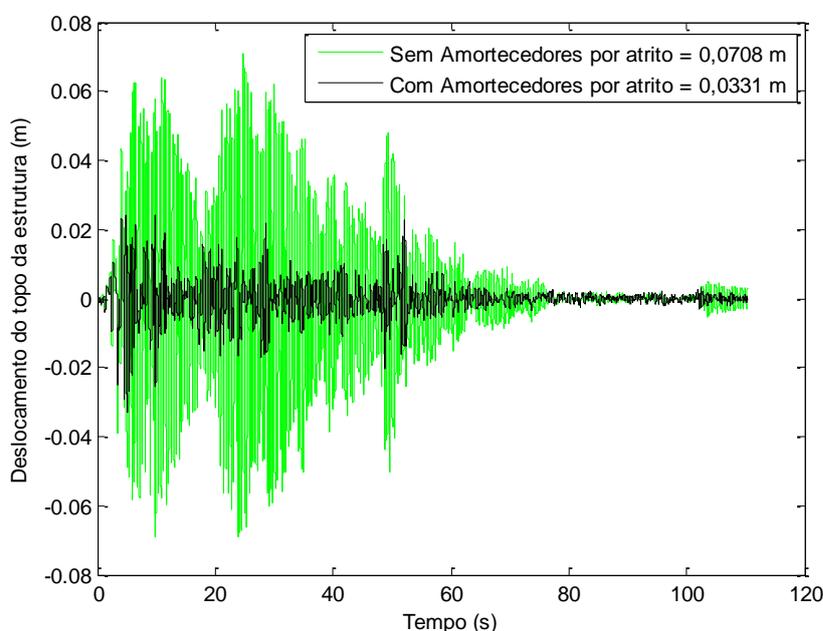


Figura B.6 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 9 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações

B.3 Comparação do deslocamento com os amortecedores em locais diferentes aos ótimos no Edifício de 9 andares submetido ao sismo El Centro

Nestas análises, os amortecedores com as forças otimizadas foram posicionados em locais diferentes aos ótimos para comparar a resposta com o deslocamento obtido após a otimização simultânea das forças e posições dos dispositivos. Na Tabela B.7 são apresentadas as forças ótimas em locais diferentes aos ótimos.

Tabela B.8 – Forças otimizadas e posições dos amortecedores de atrito

Pavimentos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	1880,7
5	1751,9
7	1934,6
9	1901,0

Como se observa na Figura B.7, a melhor resposta em termos do deslocamento é obtida com os dispositivos nos locais ótimos.

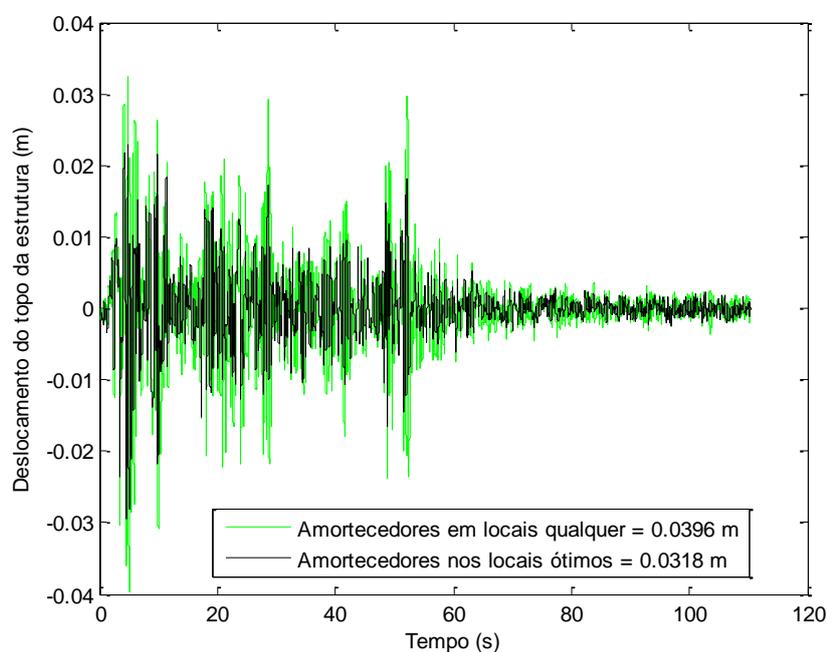


Figura B.7 - Comparação dos deslocamentos do Edifício de 9 andares submetido ao sismo El Centro com os amortecedores nos locais ótimos e em locais quaisquer.

APÊNDICE C - Resultados das simulações para o prédio de dezesseis andares com o sismo de Cauçete

No apêndice C estão resultados de mais 6 simulações, sendo 3 com 1000 iterações e 3 com 5000 iterações, para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete.

C.1 Simulações com 1000 iterações

- Simulação 2: Na Tabela C.1 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela C.1 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 2

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	915,15
2	972,40
3	876,34
4	979,21
5	985,84
6	881,87

Na Figura C.1 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

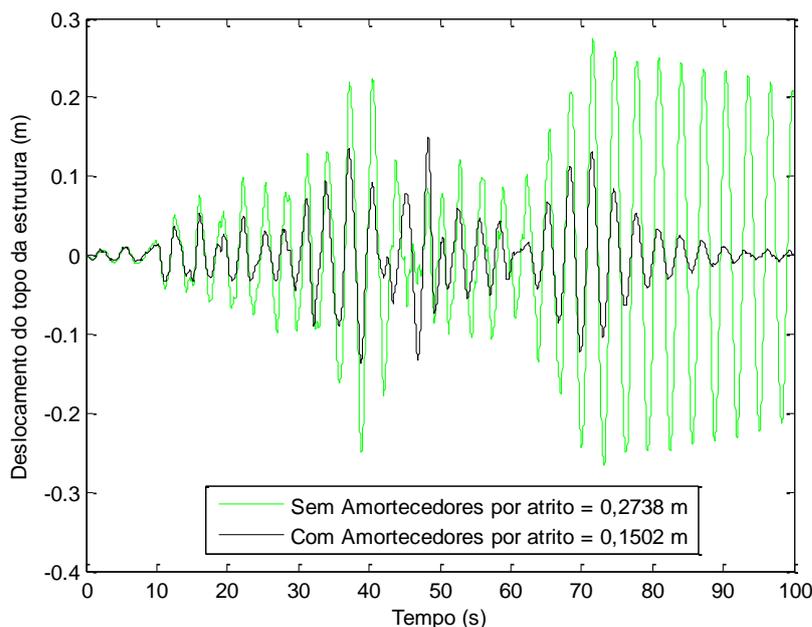


Figura C.1 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

- Simulação 3: Na Tabela C.2 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela C.2 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 3

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	819,38
2	949,27
3	696,65
5	668,34
6	724,95
10	805,45

Na Figura C.2 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

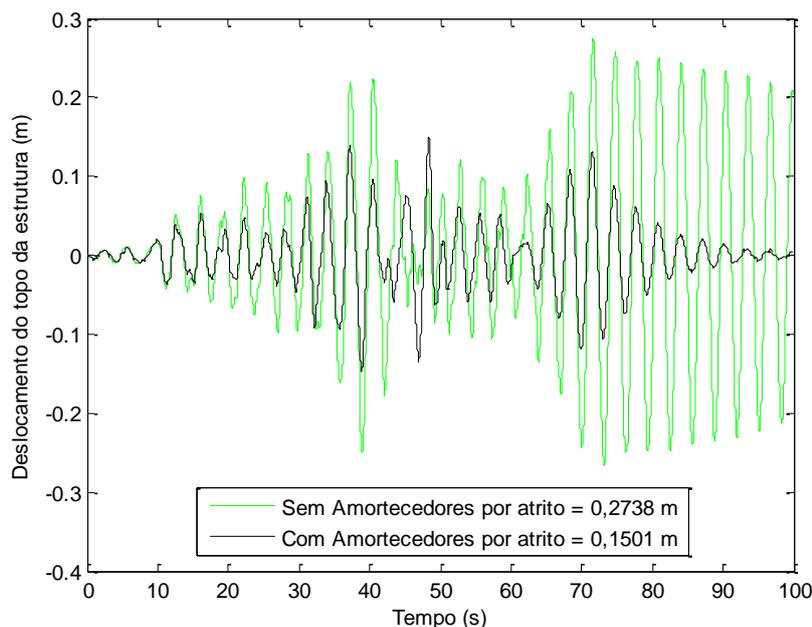


Figura C.2 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

- Simulação 4: Na Tabela C.3 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela C.3 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações Resultados da Simulação 4

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	880,86
2	850,56
3	751,44
4	708,85
5	568,52
7	799,93

Na Figura C.3 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

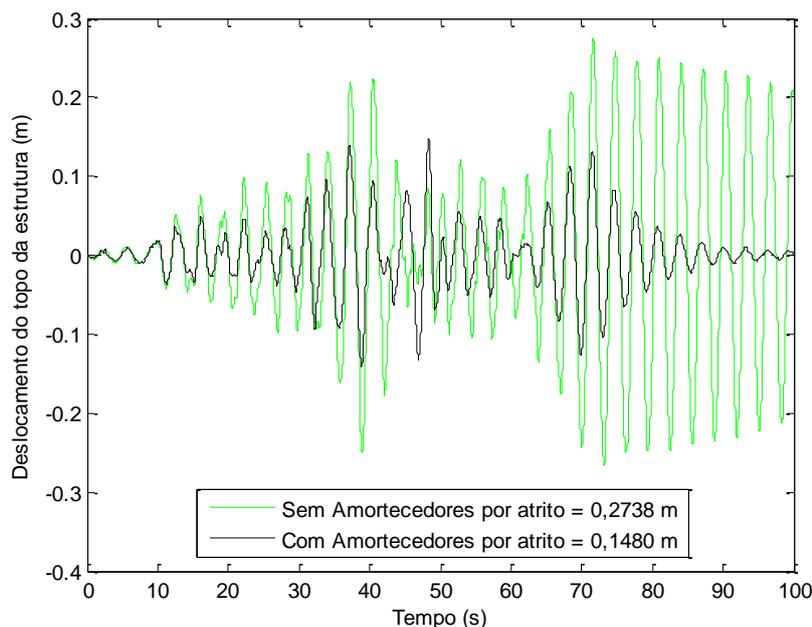


Figura C.3 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 1000 iterações

C.2 Simulações com 5000 iterações

- Simulação 2: Na Tabela C.4 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela C.4 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 2

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	772,79
4	616,03
5	782,35
6	828,40
8	707,38
9	527,47

Na Figura C.4 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

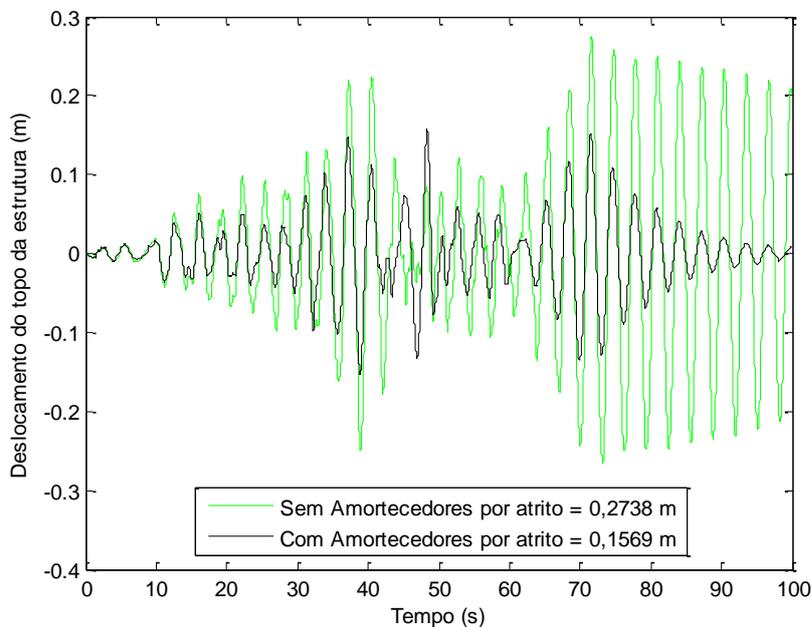


Figura C.4 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Caucete com 5000 iterações

- Simulação 3: Na Tabela C.5 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela C.5 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Caucete com 5000 iterações Resultados da Simulação 3

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	777,6
4	618,74
5	961,18
6	630,98
8	697,93
9	901,21

Na Figura C.5 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

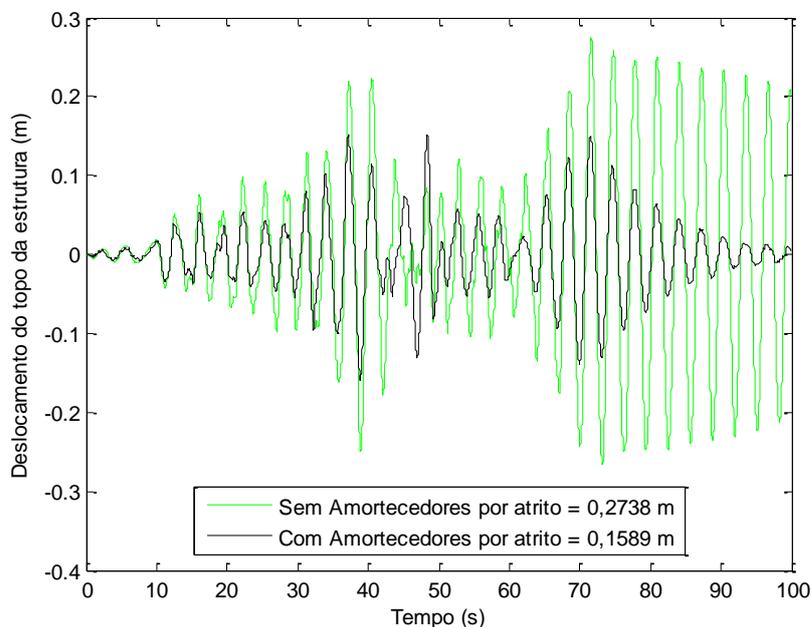


Figura C.5 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações

- Simulação 4: Na Tabela C.6 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela C.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Cauçete com 5000 iterações Resultados da Simulação 4

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	845,34
4	572,85
5	819,12
6	522,96
7	963,51
8	909,87

Na Figura C.6 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

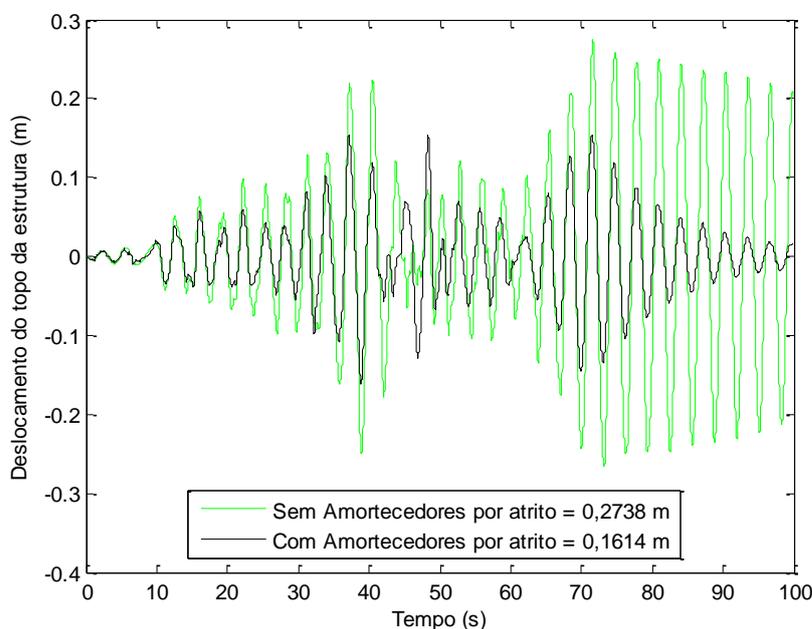


Figura C.6 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de Caucete com 5000 iterações

C.3 Comparação do deslocamento com os amortecedores em locais diferentes aos ótimos no Edifício de 16 andares submetido ao sismo Caucete

Nestas análises, os amortecedores com as forças otimizadas foram posicionados em locais diferentes aos ótimos para comparar a resposta com o deslocamento obtido após a otimização simultânea das forças e posições dos dispositivos. Na Tabela C.7 são apresentadas as forças ótimas em locais diferentes aos ótimos.

Tabela C.7 - Forças otimizadas e posições dos amortecedores de atrito

Pavimentos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	961,80
6	973,37
9	788,61
11	932,68
13	699,80
16	831,08

Como se observa na Figura C.7, a melhor resposta em termos do deslocamento é obtida com os dispositivos nos locais ótimos.

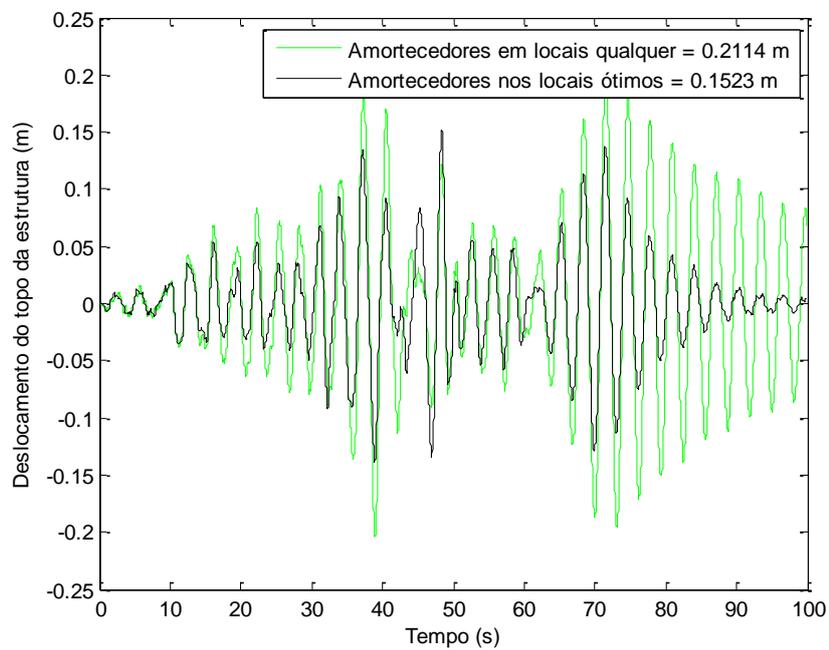


Figura C 7 - Comparação dos deslocamentos do Edifício de 16 andares submetido ao sismo Caucete com os amortecedores nos locais ótimos e em locais quaisquer.

APÊNDICE D - Resultados das simulações para o prédio de dezesseis andares com o sismo El Centro

No apêndice D estão os resultados de mais 6 simulações, sendo 3 com 1000 iterações e 3 com 5000 iterações, para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo El Centro.

D.1 Simulações com 1000 iterações

- Simulação 2: Na Tabela D.1 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela D.1 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 2

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1664,4
2	1670,8
3	1573,5
10	1403,0
11	1424,6
12	1666,4

Na Figura D.1 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

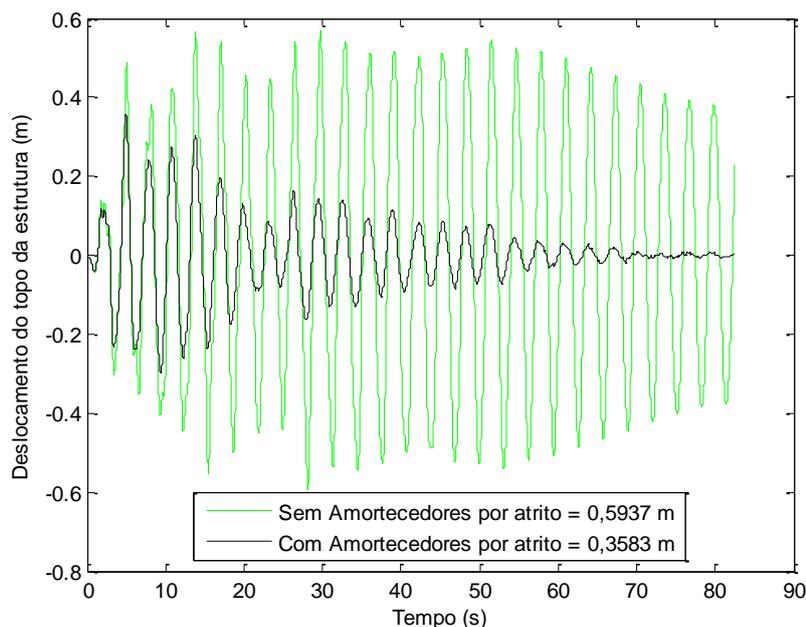


Figura D.1 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações

- Simulação 3: Na Tabela D.2 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela D.2 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 3

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1324,5
2	1642,7
3	1359,3
8	1761,3
12	1734,0
14	1539,8

Na Figura D.2 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

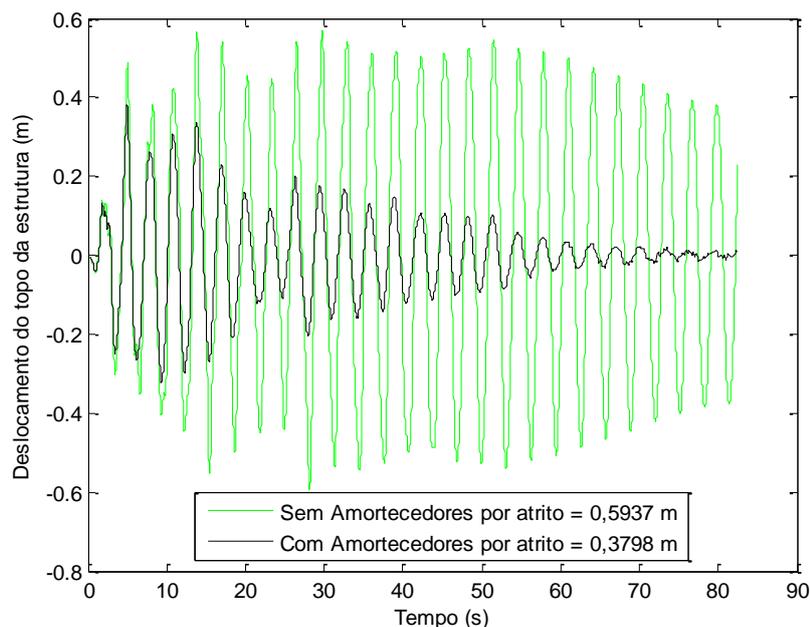


Figura D.2 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações

- Simulação 4: Na Tabela D.3 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 1000 iterações.

Tabela D.3 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações Resultados da Simulação 4

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
1	1733,1
2	1387,5
3	1713,9
4	1264,2
10	1794,7
14	1346,3

Na Figura D.3 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 1000 iterações.

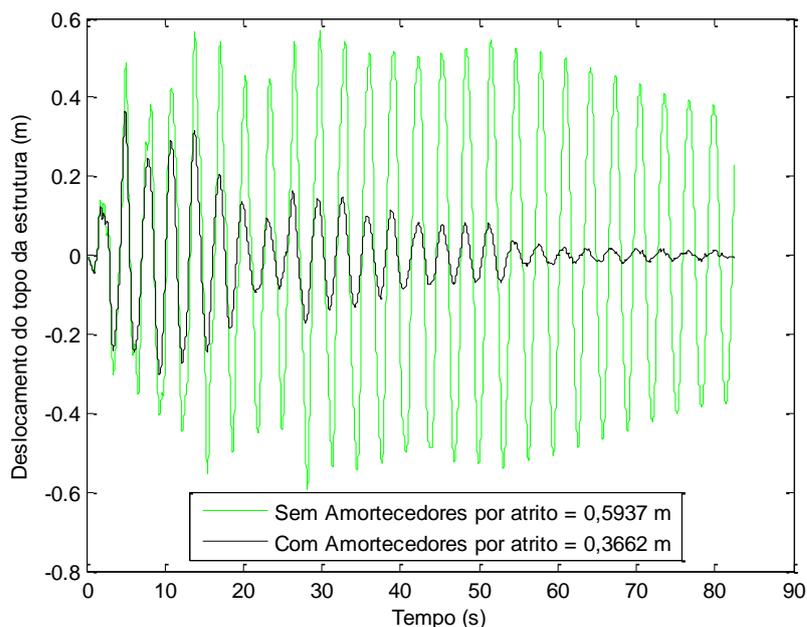


Figura D.3 - Resposta da simulação 4 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 1000 iterações

D.2 Simulações com 5000 iterações

- Simulação 2: Na Tabela D.4 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela D.4 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 2

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	1426,3
8	1666,2
9	1329,3
10	1496,3
11	1526,4
14	1343,2

Na Figura D.4 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

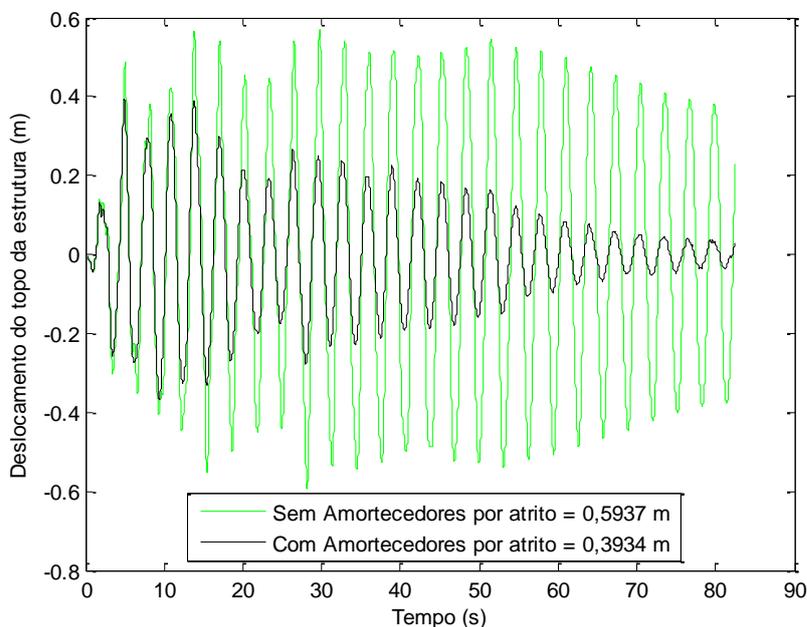


Figura D.4 - Resposta da simulação 2 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações

- Simulação 3: Na Tabela D.5 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela D.5 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 3

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	1679,5
4	1469
8	1380,1
12	1497,6
13	1593,4
14	1607,4

Na Figura D.5 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

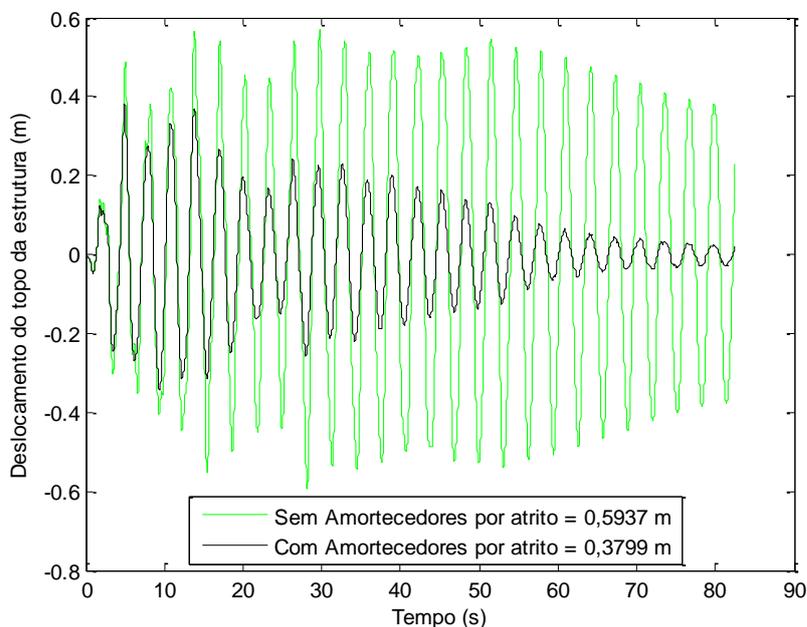


Figura D.5 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações

- Simulação 4: Na Tabela D.6 são apresentados os resultados dos locais ótimos e as forças de atrito ótimas dos 6 amortecedores de vibração por atrito para uma simulação com 5000 iterações.

Tabela D.6 - Posição e forças de atrito ótimas para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações Resultados da Simulação 4

Pavimentos ótimos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	1526,4
4	1493,1
5	1223,5
8	1339,2
11	1287,6
12	1744,3

Na Figura D.6 apresenta-se a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura sem amortecedores por atrito e com 6 amortecedores por atrito otimizados, com 5000 iterações.

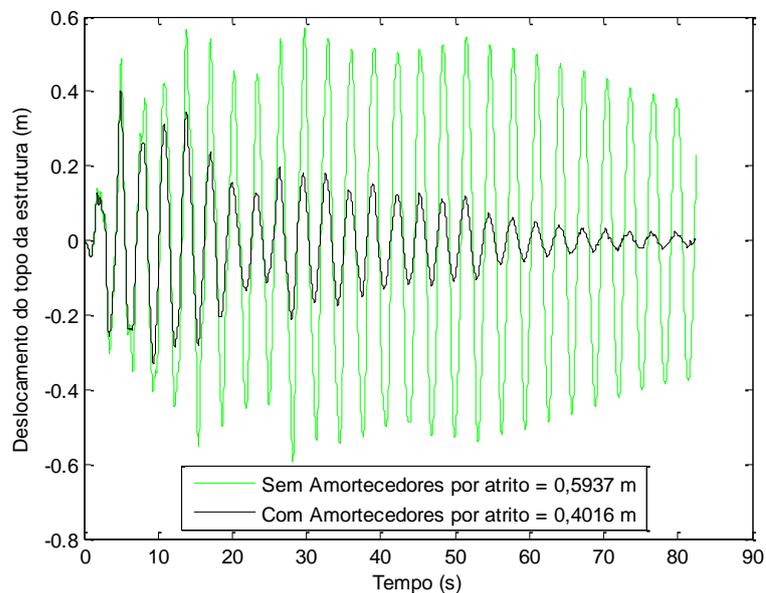


Figura D.6 - Resposta da simulação 3 em termos de deslocamento no topo para o edifício de 16 pavimentos submetido ao sismo de El Centro com 5000 iterações

D.3 Comparação do deslocamento com os amortecedores em locais diferentes aos ótimos no Edifício de 16 andares submetido ao sismo El Centro

Nestas análises, os amortecedores com as forças otimizadas foram posicionados em locais diferentes aos ótimos para comparar a resposta com o deslocamento obtido após a otimização simultânea das forças e posições dos dispositivos. Na Tabela D.7 são apresentadas as forças ótimas em locais diferentes aos ótimos.

Tabela D.7 - Forças otimizadas e posições dos amortecedores de atrito

Pavimentos para a instalação dos amortecedores	Forças de atrito ótimas (kN)
3	1741,9
6	1717,8
8	1597,2
11	1363,4
14	1714,8
16	1557,5

Como se observa na Figura D.7, a melhor resposta em termos do deslocamento é obtida com os dispositivos nos locais ótimos.

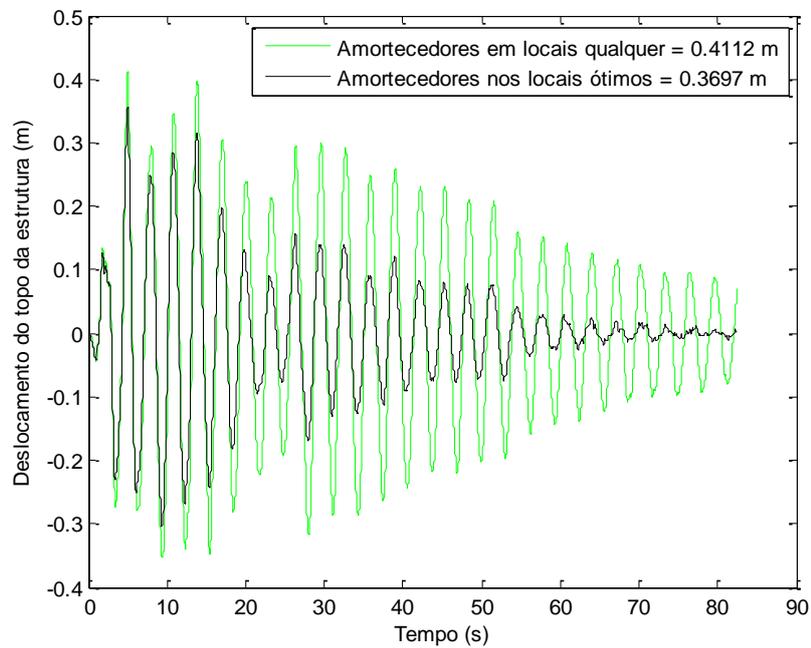


Figura D.7 - Comparação dos deslocamentos do Edifício de 16 andares submetido ao sismo El Centro com os amortecedores nos locais ótimos e em locais quaisquer.