

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

OTIMIZAÇÃO DE AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS EM
ESTRUTURAS SUBMETIDAS A UM PROCESSO ESTACIONÁRIO

Por

Luciara Vellar Rossato

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Março de 2017.

OTIMIZAÇÃO DE AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS EM
ESTRUTURAS SUBMETIDAS A UM PROCESSO ESTACIONÁRIO

Por

Luciara Vellar Rossato
Engenheira Mecânica

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^ª. Dr^ª. Leticia Fleck Fadel Miguel

Aprovada por:

Prof. Dr. Marcelo Maia Rocha,.....PPGEC/UFRGS

Prof. Dr. Roberto Domingo Rios,.....PPGEC/UFRGS

Prof. Dr. Rodrigo Rossi,.....PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 07 de Março de 2017.

À Deus

Aos meus pais e irmãos

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida, por permitir o estudo e desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço aos meus pais primeiramente pela vida, pelo incentivo e apoio em estudar, lutar por meus objetivos e sonhos, sempre dispostos a me apoiar nas diversas decisões e escolhas da vida.

Sou grata aos professores e mestres pela transmissão de seus conhecimentos com muita ênfase e empenho nos ensinamentos.

Agradeço em especial a minha professora e orientadora, Letícia Fleck Fadel Miguel, pela sabedoria transmitida e pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do GMAp pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

Ao CNPQ pela provisão da bolsa de mestrado.

RESUMO

Atualmente as estruturas estão sendo avaliadas para um maior número de ações em relação há algumas décadas. Esta melhoria ao longo da fase de concepção é dada devido ao fato de que está se tornando mais competitivo o fornecimento de estruturas leves e esbeltas, sendo solicitados, cada vez mais, projetos com menor custo de implantação. Devido a isto, é necessário avaliar as estruturas não apenas sujeitas a cargas estáticas, mas também a carregamentos dinâmicos. As ações dinâmicas que atuam sobre uma estrutura podem ser muito mais prejudiciais do que as estáticas quando não são bem consideradas e dimensionadas. Ações dinâmicas podem ser provenientes de tremores de terra, vento, equipamentos em funcionamento, deslocamento de pessoas, veículos em movimento, motores desbalanceados, entre outras fontes, o que pode causar vibrações na estrutura, podendo levar a mesma ao colapso. A fim de controlar e reduzir as amplitudes de vibração, entre outras alternativas é possível a instalação de amortecedores de massa sintonizado (AMS), que é um dispositivo de controle passivo. O AMS tem várias vantagens, tais como a grande capacidade de reduzir a amplitude de vibração, fácil instalação, baixa manutenção, baixo custo, entre outras. Para se obter a melhor relação custo-benefício, ou seja, a maior redução de amplitude aliada a um menor número de amortecedores ou a uma menor massa, a otimização dos parâmetros do AMS torna-se fundamental. Neste contexto, este trabalho visa, através de simulação numérica, propor um método para otimizar parâmetros de AMSs quando estes devem ser instalados em edifícios submetidos à excitação sísmica. Inicialmente é considerado apenas um único AMS instalado no topo do edifício e em seguida também são feitas simulações com múltiplos AMSs (MAMS), e por fim são descartados os AMSs desnecessários, obtendo assim a melhor resposta da estrutura. Para tanto, uma rotina computacional é desenvolvida em *MatLab* usando o método de integração direta das equações de movimento de Newmark para determinar a resposta dinâmica da estrutura. Para fins de análise podem ser considerados tanto sismos reais quanto artificiais. Os acelerogramas artificiais são gerados a partir do espectro proposto por Kanai e Tajimi. Primeiramente, a estrutura é analisada somente com o seu amortecimento próprio para fins comparativos e de referência. Em seguida, a otimização do ou dos AMSs é feita, na qual a função objetivo é minimizar o deslocamento máximo no topo do edifício, e as variáveis de projeto, são a relação de massas (AMS - Estrutura), rigidez e amortecimento do ou dos AMSs. Para a otimização são utilizados os algoritmos *Firefly Algorithm* e *Backtracking Search*

Optimization Algorithm. De acordo com as configurações do AMS, após a otimização dos seus parâmetros são determinadas as novas respostas dinâmicas da estrutura. Finalmente, pode-se observar que o método proposto foi capaz de otimizar os parâmetros do ou dos AMSs, reduzindo consideravelmente as respostas da estrutura após a instalação do mesmo, minimizando o risco de dano e colapso do edifício. Desta forma, este trabalho mostra que é possível projetar AMS e MAMS de forma econômica e eficaz.

Palavras-chaves: Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS); Múltiplos Amortecedores de Massa Sintonizados (MAMS); Sismo; Espectro de Kanai-Tajimi, Vibração; Otimização; Algoritmos *Firefly* e *Backtracking Search Optimization*.

ABSTRACT

Currently, structures are being evaluated for a greater number of actions when compared to a few decades ago. This improvement in designing stage is happening because projects providing lightweight and slender structures, with lower implantation costs, are being more requested. Thus, evaluating structures not only subjected to static loads, but also to dynamic loads has become necessary. Dynamic loads acting on a structure are more damaging than static loads, if they are not well considered and dimensioned. Dynamic loads could occur from earthquakes, wind, equipment, movement of people or vehicles, among other sources, which cause vibrations in structures and may lead to a collapse. Tuned mass damper (TMD), a passive control device, can be installed as an alternative to reduce vibration amplitudes. TMD has several advantages, such as large capacity to reduce amplitude of vibration, easy installation, low maintenance, low cost, among others. Optimizing TMD parameters is fundamental for obtaining best cost-benefit relation, *i.e.*, greater amplitude reduction along with lower number of dampers or lower mass. In this context, this study aims at proposing, through numerical simulation, a method for optimizing TMD parameters when installing them on buildings under seismic excitation. Initially, a single-TMD case is considered, then simulations with multiple-TMDs (MTMDs) are run; lastly, unnecessary TMDs are discarded, obtaining the best structural response. For this purpose, a computational routine is developed on MatLab using Newmark direct integration method for equations of motion to determine the dynamic structural response. Both real and artificial earthquakes are considered for purposes of analysis. Artificial accelerograms are generated from proposed Kanai-Tajimi spectrum. First, structure is analyzed only with its own damping for comparison and reference. Second, a single or multiple-TMD optimization is carried out, in which the objective function is to minimize the maximum displacement at the top of the building, and the design variables are modal mass ratio (Structure-TMD), stiffness and damping of a single or multiple-TMD. Firefly and Backtracking Optimization algorithms are used for optimization. According to TMD settings, new dynamic structural responses are determined after optimizing parameters. Finally, the proposed method could optimize parameters of single or multiple-TMDs, considerably reducing structural responses after their installation, minimizing the risk of damage and building collapse. Thus, this study shows the possibility of designing TMDs or MTMDs both economically and effectively.

Keywords: Tuned Mass Damper (TMD); Multiple Tuned Mass Dampers (MTMD); Earthquake; Kanai-Tajimi Spectrum; Vibration; Optimization; Firefly and Backtracking Search Optimization Algorithms.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Organização do Trabalho.....	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1	Ações Dinâmicas em Estruturas	5
2.1.1	Sismo	6
2.2	Sistemas de Controle de Vibrações	7
2.2.1	Sistemas Passivos	7
2.2.2	Sistemas Ativos	8
2.2.3	Sistemas Semi-Ativos.....	8
2.2.4	Sistemas Híbridos	9
2.3	Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS).....	10
2.4	Otimização.....	13
3	MÉTODOS UTILIZADOS.....	17
3.1	Auto Correlação.....	17
3.2	Densidade Espectral.....	17
3.3	Geração do Sinal de Excitação	20
3.4	Resposta Dinâmica da Estrutura.....	20
3.5	Método Newmark	21
3.6	Dimensionamento de Um Único AMS pelo Método de Villaverde.....	22
3.7	Dimensionamento de Múltiplos AMS.....	24
3.8	Algoritmos de Otimização Utilizados	25
3.8.1	Firefly Algorithm (FA).....	25
3.8.2	Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA).....	28
3.8.2.1	Inicialização.....	29
3.8.2.2	Seleção.....	29
3.8.2.3	Mutação	29
3.8.2.4	Crossover.....	30
3.8.2.5	Seleção-II.....	31

3.9	Deslocamento Entre Andares (Drift) - Norma NBR15421	33
4	VERIFICAÇÃO DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	
	DESENVOLVIDOS.....	35
4.1	Verificação do Programa de Geração do Sismo Artificial	35
4.2	Verificação da Análise Dinâmica Sem AMS, Opção 1 – Por Mohebbi (1 Único AMS)	37
4.3	Verificação da Análise Dinâmica Com Um AMS.....	38
4.4	Verificação da Análise Dinâmica Sem AMS, Opção 2 – Por Miguel (Múltiplos AMS)	41
4.5	Verificação da Análise Dinâmica Com 10 AMS.....	42
5	EXEMPLO ILUSTRATIVO: RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	Estrutura em Estudo.....	47
5.2	Geração do Sinal Sísmico	48
5.3	Análise Dinâmica Sem AMS.....	51
5.4	Análise Dinâmica Com AMS	52
5.4.1	Análise Dinâmica Com Um Único AMS Pelo Método De Villaverde Uma Variável de Projeto.....	53
5.4.1.1	Algoritmos Firefly - FA e Backtracking Search Optimization – BSA.....	53
5.4.2	Análise Dinâmica Com Um Único AMS Pelo Método De Villaverde Três Variáveis De Projeto	55
5.4.2.1	Algoritmo Firefly - FA	56
5.4.2.2	Algoritmo Backtracking Search Optimization - BSA	59
5.4.3	Análise Dinâmica Com Um Único AMS Três Variáveis De Projeto Diretamente (Sem o Método De Villaverde)	61
5.4.3.1	Algoritmo Firefly - FA	61
5.4.3.2	Algoritmo Backtracking Search Optimization - BSA	64
5.4.4	Análise Dinâmica Com Múltiplos AMS (1 Por Andar) Com Relação de Massas Iguais	65
5.4.4.1	Algoritmo Firefly - FA	66
5.4.4.2	Algoritmo Backtracking Search Optimization – BSA	69
5.4.5	Análise Dinâmica Com Múltiplos AMS (1 Por Andar) Com Relação de Massas Diferentes.....	72

5.4.5.1 Algoritmo Firefly - FA	73
5.4.5.2 Algoritmo Backtracking Search Optimization – BSA.....	76
5.4.6 Análise Dinâmica Com Múltiplos AMS Com Relação de Massas Diferentes, Melhor Resposta Sem AMS em 4 Andares	79
5.4.6.1 Verificação da Melhor Configuração	80
5.4.6.2 Comparativo Maior Número de Avaliações	83
5.5 Seleção da Melhor Configuração.....	88
5.6 Análise da Melhor Configuração em Relação ao Drift.....	91
6 CONCLUSÕES.....	92
6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	A área sob a curva da densidade espectral é igual a $E[x^2]$	19
Figura 3.2	Edifício de n-graus de liberdade com MAMS horizontalmente e verticalmente distribuídos ao longo da estrutura – Fonte Miguel et al., 2016.....	24
Figura 3.3	Pseudocódigo Firefly Algorithm [Adaptado de Xin_She Yang, 2009].....	26
Figura 3.4	Estrutura geral do BSA – Fonte adaptada de Civicioglu (2013)	28
Figura 3.5	Estratégia de crossover de BSA – Fonte adaptada de Civicioglu (2013)	30
Figura 3.6	Mecanismo de controle de limite de BSA – Fonte adaptada de Civicioglu (2013).....	31
Figura 3.7	Pseudocódigo de BSA – Fonte adaptada de Civicioglu (2013).....	32
Figura 4.1	Aceleração do solo em função do tempo	36
Figura 4.2	Aceleração do solo em função do tempo [Mohebbi et al., 2012]	36
Figura 4.3	Espectro do sinal de aceleração	36
Figura 4.4	Deslocamentos no último andar do edifício. a) Simulação 1; b) simulação 2; c) simulação 3; e d) simulação 4.....	38
Figura 4.5	Aceleração do solo em função do tempo. Sismo El Centro.....	39
Figura 4.6	Deslocamentos do 10º andar. a) AMS com parâmetros de Bekdas e Nigdeli; b) AMS com parâmetros de Hadi e Arfiadi; c) AMS com parâmetros de Lee et al.	41
Figura 4.7	Deslocamentos do último andar da estrutura não controlada	42
Figura 4.8	Deslocamentos do último andar da estrutura para o Scenario 1.....	44
Figura 4.9	Deslocamentos do último andar do edifício. a) AMS Miguel et al.; b) AMS Presente estudo com BSA; c) AMS Presente estudo com FA.....	46
Figura 5.1	Estrutura com 10 GDL.....	47
Figura 5.2	Densidade espectral de Kanai-Tajimi (Eq. 3.15).....	48
Figura 5.3	a) Aceleração do solo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi em função do tempo; b) Espectro do sinal de aceleração do solo gerado.	49
Figura 5.4	Deslocamentos do último andar do edifício.....	51
Figura 5.5	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	52
Figura 5.6	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	55
Figura 5.7	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	59

Figura 5.8	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	60
Figura 5.9	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	63
Figura 5.10	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	65
Figura 5.11	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	69
Figura 5.12	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	72
Figura 5.13	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	76
Figura 5.14	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	79
Figura 5.15	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	86
Figura 5.16	Deslocamentos e acelerações do último andar.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Limitação para deslocamentos relativos de pavimentos (Δx).....	33
Tabela 3.2	Definição das categorias de utilização e dos fatores de importância de utilização (I).....	34
Tabela 4.1	Comparativo deslocamentos e acelerações sem AMS.....	37
Tabela 4.2	Valores do AMS.	39
Tabela 4.3	Comparativo deslocamentos [m] com AMS.....	40
Tabela 4.4	Comparativo deslocamentos [m] sem AMS.	42
Tabela 4.5	Comparativo deslocamentos [m] com 10 AMS Scenario 1.....	43
Tabela 4.6	Parâmetros de rigidez, amortecimento e respostas em termos de deslocamentos, encontrados por Miguel 2016 scenario 2.....	44
Tabela 4.7	Comparativo deslocamentos, rigidezes e amortecimentos com 10 AMS Scenario 2.....	45
Tabela 5.1	Propriedades do edifício em estudo.....	47
Tabela 5.2	Deslocamentos máximos dos andares da estrutura submetida aos sinais sísmicos.....	50
Tabela 5.3	Acelerações máximas dos andares da estrutura submetida aos sinais sísmicos.....	50
Tabela 5.4	Deslocamentos e acelerações máximos por andar.....	51
Tabela 5.5	Valores ótimos do AMS para μ de 0,03.....	53
Tabela 5.6	Deslocamentos e acelerações por andar.....	54
Tabela 5.7	Valores ótimos do AMS para μ de 0,02015, rigidez 0,9609 e amortecimento 0,3342.....	56
Tabela 5.8	Deslocamentos e acelerações por andar.....	57
Tabela 5.9	Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações.....	57
Tabela 5.10	Valores ótimos do AMS para μ de 0,03, rigidez 0,9989 e amortecimento 0,399.....	58
Tabela 5.11	Deslocamentos e acelerações por andar.....	58
Tabela 5.12	Valores ótimos do AMS para μ de 0,03, rigidez 0,9996 e amortecimento 0,3906.....	59
Tabela 5.13	Deslocamentos e acelerações por andar.....	60

Tabela 5.14	Valores ótimos do AMS para μ de 0,02225.....	61
Tabela 5.15	Deslocamentos e acelerações por andar.....	62
Tabela 5.16	Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500 e 5000 avaliações.....	63
Tabela 5.17	Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500 e 5000 avaliações.....	63
Tabela 5.18	Valores ótimos do AMS para μ de 0,02549.....	64
Tabela 5.19	Deslocamentos e acelerações por andar.....	64
Tabela 5.20	Valores ótimos do AMS para μ de 0,002259.....	66
Tabela 5.21	Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações.....	67
Tabela 5.22	Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações.....	67
Tabela 5.23	Tempo para otimização algoritmo Firefly.....	68
Tabela 5.24	Deslocamentos e acelerações por andar.....	68
Tabela 5.25	Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações.....	70
Tabela 5.26	Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações.....	70
Tabela 5.27	Valores ótimos do AMS para μ de 0,02303.....	71
Tabela 5.28	Tempo para otimização algoritmo BSA.....	71
Tabela 5.29	Deslocamentos e acelerações por andar.....	71
Tabela 5.30	Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações.....	73
Tabela 5.31	Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações.....	74
Tabela 5.32	Tempo para otimização algoritmo Firefly.....	74
Tabela 5.33	Relações de massas diferentes para os andares - algoritmo Firefly.....	74
Tabela 5.34	Valores ótimos do AMS para as relações de massas μ	75
Tabela 5.35	Deslocamentos e acelerações por andar.....	75
Tabela 5.36	Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações.....	77

Tabela 5.37	Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações	77
Tabela 5.38	Tempo para otimização algoritmo BSA	77
Tabela 5.39	Relações de massas diferentes andares algoritmo BSA.....	78
Tabela 5.40	Valores ótimos do AMS para as relações de massas μ	78
Tabela 5.41	Deslocamentos e acelerações por andar.....	79
Tabela 5.42	Relações de massas diferentes andares algoritmo Firefly.....	81
Tabela 5.43	Valores ótimos do AMS para as relações de massas μ	81
Tabela 5.44	Deslocamentos e acelerações por andar.....	82
Tabela 5.45	Relações de massas diferentes andares algoritmo BSA.....	82
Tabela 5.46	Valores ótimos do AMS para as relações de massas μ	83
Tabela 5.47	Deslocamentos e acelerações por andar.....	83
Tabela 5.48	Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações	84
Tabela 5.49	Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações	85
Tabela 5.50	Tempo para otimização algoritmo Firefly	85
Tabela 5.51	Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações	87
Tabela 5.52	Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações	87
Tabela 5.53	Tempo para otimização algoritmo BSA	87
Tabela 5.54	Respostas da estrutura com as diversas configurações da seção 6.4.	90
Tabela 5.55	Melhor configuração para o dispositivo de amortecimento.....	90
Tabela 5.56	Drift em cm da melhor configuração.	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADMF	Fator dinâmico de aceleração
ALS	Amortecedores de Líquidos Sintonizados
AMS	Amortecedor de Massa Sintonizada
BSA	<i>Backtracking Search Optimization Algorithm</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DDMF	Fator dinâmico de deslocamento
EA	Algoritmo evolutivo
FA	<i>Firefly Algorithm</i>
GA	<i>Genetic algorithm</i>
GMAp	Grupo de Mecânica Aplicada
HMD's	<i>Hybrid Mass Dampers</i>
HS	<i>Harmony Search Algorithm</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MAMS	Amortecedores de Massa Sintonizada Múltiplos
MDOF	<i>Multiple Degree of Freedom</i>
MMS	Escala de Magnitude de Momento
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
NMA	<i>Nelder-Mead Algorithm</i>
PGA	<i>Peak Ground Acceleration</i>
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PSD	Densidade Espectral de Potência
SDOF	<i>Single Degree of Freedom</i>
SGA	<i>Search Group Algorithm</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Amortecimento de cada andar, KNs/m
$[C]$	Matriz de amortecimento do sistema
D	Dimensão do problema do Algoritmo BSA
dt	Incremento de tempo, s
$E[x^2]$	Área sob a curva de densidade espectral
F	Controla a amplitude da matriz de pesquisa (antiga <i>Old P</i> - P)
F_j	Fatores de participação
hsx	Distância entre as duas elevações correspondentes ao pavimento em questão
I	Fatores de importância de utilização das edificações
$I(r)$	Intensidade da luz dos vagalumes
I_0	Intensidade da luz na origem
I_s	Intensidade da luz na fonte
k	Rigidez de cada andar, KN/m
$[K]$	Matriz de rigidez do sistema
L_j	Fator modal de participação sísmica do modo j
m	Massa de cada andar, kg
$[M]$	Matriz de massa do sistema
M_j	Massa modal, kg
m_s	Massa da estrutura, kg
m_T	Massa do AMS, kg
N	Tamanho da população do Algoritmo BSA
<i>Old P</i>	Geração anterior no algoritmo BSA
P	População do Algoritmo BSA
P_{best}	Melhor indivíduo de P
P_i	Objetivo individual na população P
r_{ij}	Distância entre vagalume i e vagalume j
$R_x(\tau)$	Correlação
$S(w)$	densidade espectral de potência
S_0	densidade espectral constante
$S_x(w)$	Densidade espectral do processo x

T	Forma final da população
t	Tempo, s
t_f	Tempo final, s
t_i	Tempo inicial, s
U	Distribuição uniforme
\vec{x}_g	Aceleração do solo, m/s ²
$\vec{\ddot{x}}(t_0)$	Aceleração inicial, m/s ²
$\vec{\ddot{x}}(t_i)$	Aceleração no tempo t , m/s ²
$\vec{\dot{x}}(t_i)$	Velocidade no tempo t , m/s
$\vec{\ddot{x}}(t_{i+1})$	Aceleração no tempo $t+\Delta t$, m/s ²
$\vec{\dot{x}}(t_{i+1})$	Velocidade no tempo $t+\Delta t$, m/s
$\vec{x}(t)$	Deslocamento do sistema, em função do tempo, m
$\vec{\ddot{x}}(t)$	Aceleração do sistema, em função do tempo, m/s ²
$\vec{\dot{x}}(t)$	Velocidade do sistema, em função do tempo, m/s
$x(t)$	Autocorrelação no instante de tempo t
$x(t+\tau)$	Autocorrelação no instante de tempo $t+\tau$
$\vec{x}(t_i)$	Deslocamento no tempo t , m
$\vec{x}(t_{i+1})$	Deslocamento no tempo $t+\Delta t$, m
ω_g	frequência natural do solo, rad/s
β	Atração dos vagalumes
β_0	Atratividade em $r = 0$
β_j	Constante que fornece o vetor normalizado do fator de participação unitário φ_j
φ_j	Fator de participação unitário
Φ_j	Modo de vibração normalizado
ϕ_k	Ângulo de fase
Φ_m	Modo de vibração
ζ_g	Amortecimento natural do solo
ζ_T	Amortecimento do AMS
ζ_s	Amortecimento da estrutura
Δt	Intervalo de tempo, s

Δx	deslocamentos relativos de um pavimento x, m
$\bar{\xi}_x$	Deslocamentos absolutos nas elevações, m
α	Parâmetro para estabilidade do método de Newmark
γ	Coefficiente de absorção de luz fixa
δ	Parâmetro para estabilidade do método de Newmark
μ	Relação de massas

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda por estruturas cada vez mais leves, com menor custo de implantação, são necessárias avaliações mais criteriosas quanto ao dimensionamento. Um fator relevante na concepção e projeto de estruturas, são as ações dinâmicas às quais estas estruturas estão suscetíveis. Estas são provenientes de diversos tipos de fontes, dentre elas, o vento, tremores de terra, equipamentos em funcionamento, movimentação de pessoas (caminhar, correr, pular, etc.), bem como, movimentação de veículos, entre outras. São responsáveis muitas vezes pelo colapso da estrutura, em função de que os efeitos podem ocasionar solicitações superiores aos de avaliação estática, nas quais as amplitudes de vibração podem ficar acima dos valores admissíveis. Um dimensionamento errôneo tanto para cargas estáticas quanto para dinâmicas pode criar falhas de segurança ou de funcionamento, as quais tornem inviáveis ou desconfortáveis a utilização da estrutura.

Quando as estruturas estão submetidas a carregamentos dinâmicos na qual a frequência da excitação se encontra próxima à frequência natural da mesma, esta entra em ressonância, ocasionando o incremento das amplitudes. Isto implica a redução da vida útil em equipamentos, problemas de conforto e de utilização em estruturas, podendo ocorrer problemas de integridade estrutural e até mesmo o colapso.

Dentre as ações dinâmicas, citam-se em especial neste trabalho, as sísmicas, que não são de caráter totalmente previsível. Embora no Brasil tenha-se o mito de que tremores de terra não ocorram, os mesmos existem, no entanto, em sua maioria são muito pequenos, não ultrapassando os 4 graus na escala Richter. Até 2011, somente dois sismos haviam atingido a escala de 6 graus na escala Richter. Vale ressaltar, que mesmo com a magnitude baixa, sem ocorrência de grandes danos até o momento, dependendo da magnitude da estrutura e as consequências de seu colapso é necessário fazer o dimensionamento das estruturas para eventos sísmicos, tanto para sua integridade quanto para conforto dos usuários.

Visando obter as amplitudes de vibração de uma estrutura submetida a eventos sísmicos, pode-se proceder de duas maneiras distintas. A primeira é a de recorrer a registros de acelerogramas de sismos reais que ocorreram nas proximidades de implantação da estrutura. No entanto, em função de não haver registros de sismos em todas as regiões, a segunda alternativa, que é a de simular um registro de excitação sísmica torna-se relevante. Uma opção muito utilizada para gerar um acelerograma é o uso do espectro proposto por Kanai e Tajimi,

1961, no qual são levadas em consideração as características do solo do local onde a estrutura será implantada.

Nas últimas décadas tem-se investido em estudos de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para controle de vibrações para melhorar o desempenho das estruturas frente às cargas dinâmicas. Atualmente já é bem conhecido que instalar amortecedores externos ao sistema reduz as amplitudes de vibração. Entretanto, quais os parâmetros ideais de cada amortecedor ou quais as melhores posições destes dentro da estrutura permanecem sendo problemas de grande interesse da comunidade científica.

Os sistemas de controle de vibrações são dimensionados e instalados com a finalidade de reduzir as amplitudes de vibrações das estruturas, sendo que através da utilização de algoritmos de otimização é possível maximizar ou minimizar uma função objetivo previamente definida, visando encontrar uma solução ótima do problema, ou seja, que resulte na melhor relação custo-benefício.

Existem diversos algoritmos de otimização disponíveis para utilização, visando à busca dos melhores parâmetros para o desempenho ótimo do sistema, fazendo com que o mesmo atenda aos requisitos especificados em normas regulamentadoras.

1.1 Motivação

A principal motivação deste trabalho é estudar duas grandes áreas dentro da engenharia que são de extrema importância: a área de dinâmica estrutural aliada à área de otimização.

Como comentado, posto anteriormente, a área de dinâmica estrutural vem ganhando cada vez mais atenção, e hoje em dia é fundamental que as estruturas sejam verificadas quanto a carregamentos dinâmicos. A utilização de sistemas de controle de vibrações para reduzir as amplitudes causadas pelas ações dinâmicas é um campo que tem crescido muito atualmente e dentro destes sistemas de controle, os AMSs são um dos mais utilizados na prática.

Entretanto, apesar de já ser conhecido que o uso de dissipadores de energia reduz as amplitudes de vibração, ainda é difícil de se determinar os parâmetros ótimos de cada amortecedor e até mesmo a quantidade e posição ideal destes dissipadores. Portanto, paralelamente a área de dinâmica estrutural, para utilizar os dispositivos de forma econômica e ao mesmo tempo eficaz, é interessante unir esta área com a área de otimização estrutural, área na qual também se tem investido muito em pesquisa atualmente.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é propor e aplicar um método para otimização de parâmetros de amortecedores de massa sintonizados instalados em estruturas submetidas à excitação sísmica para minimizar a resposta dinâmica do sistema.

Para atingir este objetivo principal, é necessário alcançar os seguintes objetivos secundários:

- 1 Desenvolver, via *software MatLab*, um programa para geração de um acelerograma sísmico através da utilização do espectro proposto por Kanai, 1961, e Tajimi, 1961;
- 2 Desenvolver, em *MatLab*, um programa para análise modal e dinâmica de estruturas. As respostas dinâmicas em termos de amplitudes de deslocamento, velocidade e aceleração, são determinadas através do método de integração numérica de Newmark;
- 3 Implementar metodologia, utilizando o *MatLab*, para a determinação dos parâmetros, como massa, rigidez e amortecimento, do amortecedor de massa sintonizada, através do método de Villaverde (1980) e Villaverde (1985) para um AMS, instalado no topo da estrutura;
- 4 Otimizar os parâmetros do AMS, unindo os programas desenvolvidos nas etapas acima com dois algoritmos de otimização distintos FA (*Firefly Algorithm*) e BSA (*Backtracking Search Optimization Algorithm*), com o objetivo de minimizar a resposta dinâmica da estrutura;
- 5 Comparar as respostas e o tempo computacional de cada um dos algoritmos;
- 6 Desenvolver, via *MatLab*, um programa para a determinação dos parâmetros ótimos de múltiplos AMS (MAMS).
- 7 Aplicar os métodos em problemas da literatura considerados casos padrões, e comparar os resultados obtidos aos encontrados na literatura, para demonstrar a eficiência dos métodos e programas desenvolvidos;
- 8 Aplicar os métodos de otimização com implantação do AMS em uma estrutura nova, proposta pelo autor, para avaliar a eficiência da redução das amplitudes de vibração com a implantação de um AMS, bem como de múltiplos AMS;
- 9 Finalmente, comparar o desempenho das metodologias utilizadas (um único AMS e múltiplos AMS), e apontar as vantagens de cada um nos problemas analisados. Desta forma, são feitos comparativos entre todas as respostas da estrutura e selecionada a melhor configuração levando em conta custo-benefício, bem como, o deslocamento relativo entre andares (*Drift*).

1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, dos quais esta introdução é o primeiro.

Na sequência, o capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e revisão bibliográfica, tratando das ações dinâmicas em estruturas, sistemas de controle de vibrações, amortecedor de massa sintonizado (AMS) e otimização estrutural, relatando o estado da arte.

Após a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica, no capítulo 3 são apresentados os métodos utilizados, dando ênfase a auto correlação, densidade espectral, geração de sinal de excitação, resposta dinâmica da estrutura, método de Newmark, dimensionamento de um único AMS, dimensionamento de múltiplos AMS, algoritmos de otimização utilizados e Norma NBR15421, descrevendo a metodologia detalhadamente.

Com o objetivo de testar e verificar os programas desenvolvidos nesta dissertação, no capítulo 4 os métodos descritos no capítulo anterior são aplicados a problemas já estudados por outros autores, comprovando a eficácia dos programas elaborados neste trabalho.

Após a confirmação de que os programas desenvolvidos funcionaram bem em problemas clássicos da literatura, no capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos em uma estrutura proposta pelo autor, juntamente com comparativos dos métodos e algoritmos utilizados, e a seleção da melhor solução quanto à redução de deslocamentos, acelerações, menor relação de massas e deslocamento entre andares (*Drift*).

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ações Dinâmicas em Estruturas

As ações dinâmicas são um fator de grande relevância na concepção do projeto de estruturas, pois muitas vezes estas ações são as responsáveis por seu colapso. Entre as diversas ações dinâmicas podem-se citar equipamentos em funcionamento, movimentação de pessoas, movimentação de veículos, ação do vento, tremores de terra, entre outras. Independentemente da ação dinâmica à qual a estrutura estará suscetível, há duas maneiras de determinar os efeitos destas ações, na qual a primeira é efetuando a medição da aceleração gerada pela excitação em estruturas existentes (acelerogramas), e a segunda opção é a geração de excitação através de métodos numéricos, ou seja, métodos teóricos que se aproximam da excitação em si.

Por exemplo, o caminhar de pessoas sobre uma ponte ou passarela, o qual produz vibrações verticais e horizontais (longitudinais e transversais). Para a determinação destas ações, pode-se proceder com a utilização de modelagem matemática com conceitos estocásticos, em que são levados em consideração a massa da pessoa, o número de pessoas, comprimento da passada.

Para a determinação da ação do vento sobre uma estrutura pode-se proceder de duas maneiras teóricas distintas. A primeira e mais simples considera carregamentos estáticos equivalentes, conforme a NBR 6123 Forças devidas ao vento em edificações. Como segunda opção é considerar o vento como um processo aleatório, o qual utiliza o espectro de potência teórico proposto por Davenport, 1961, por exemplo.

A ação devida a equipamentos em estruturas e bases, da mesma forma como o caminhar de pessoas produz vibrações verticais e horizontais (longitudinais e transversais). A ação proveniente de equipamentos é devida ao desbalanceamento do rotor. Para a determinação destas ações, pode-se proceder com a utilização de modelagem matemática, onde são levados em consideração a massa do rotor do equipamento, como frequência circular e excentricidade do rotor, conforme *Eurocode 1(2002)*, por exemplo.

Para o bom funcionamento de máquinas rotativas e o bom desempenho de estruturas sem danos, a ISO 2372 estabelece limites de vibração que dependem da potência da máquina e do tipo de fundação. As vibrações são medidas em pontos das superfícies das máquinas que

operam com frequência na faixa de 10 a 1000Hz, e são classificadas quanto à classe do equipamento *versus* as velocidades de severidade de vibração em mm/s.

Srinivasulu e Vaidyanathan, 1976, é outra referência disponível na literatura a qual fornece uma classificação mais simples de limites de amplitudes de vibrações para diversos tipos de máquinas. A classificação é dividida em: máquinas de baixa velocidade (até 500rpm), fundações de martelos e máquinas de alta velocidade (dividida em duas velocidades 3000rpm e 1500 rpm, sendo subdivididas em vibrações verticais e horizontais). A limitação da vibração se dá pela amplitude permissível em cm para cada uma das opções listadas acima.

A ação devida a tremores de terra pode ser considerada utilizando-se de acelerogramas de sismos reais ocorridos nas proximidades da implantação da estrutura, ou através da geração de sismos artificiais utilizando, por exemplo, o espectro proposto por Kanai, 1961, e Tajimi, 1961.

2.1.1 Sismo

Sismo, também chamado de abalo sísmico, terremoto ou tremor de terra, é o nome dado à liberação de energia na crosta do planeta terra, o qual geralmente ocorre devido ao choque de placas tectônicas, criando as ondas sísmicas. A atividade sísmica é referente à frequência, tipo e tamanho dos terremotos registrados de uma área em um período de tempo. Os sismos são registrados através de sismógrafos, com a qual a forma de medição é através de uma escala de magnitude de momento (MMS) que mede a magnitude dos terremotos em termos de energia liberada. Os registros de sismos com magnitude menor que 5 ocorrem com maior frequência, e são verificados por observatórios utilizando a escala local, mais conhecida como escala de Richter. A escala de magnitude de momento e a escala Richter possuem semelhanças numéricas. A escala de magnitude de momento introduzida por Thomas C. Haks, 1979, e Hiroo Kanamori, 1979, veio a substituir a escala Richter desenvolvida por Charles Francis Richter, 1930. Os sismos com intensidade menor que 3 na escala local são quase imperceptíveis, enquanto que os maiores que 7 podem ocasionar diversos danos às estruturas, dependendo da profundidade do sismo quanto à crosta terrestre. Para escalas maiores é utilizada a escala de Mercalli desenvolvida e adaptada por Giuseppe Mercalli, 1956. Quanto mais raso for o sismo, ou seja, mais superficial à crosta terrestre, maior será a sua magnitude e maiores serão os danos causados.

A cada ano são estimados 500 mil terremotos detectados através da instrumentação existente, sendo que cerca de 20% destes podem ser sentidos [Pressler, 2010]. A maioria dos terremotos ocorre frequentemente em locais como Califórnia e Alasca nos Estados Unidos, em países como El Salvador, México, Guatemala, Chile, Peru, Indonésia, Irã, Paquistão, Açores em Portugal, Turquia, Nova Zelândia, Grécia, Itália, Índia e Japão, de acordo com *Earthquake Hazards Program*.

Um dos mais recentes sismos ocorridos foi no Chile em 25 de dezembro de 2016, o qual teve o registo de magnitude 7,6 na escala de Richter. Este sismo ocasionou diversas destruições. Ocorreu às 11h22min do horário local, a 67 quilômetros noroeste da cidade de Melinka, na Ilha de Chiloé, localizada em frente à costa da região de Los Lagos (1.021km ao sul de Santiago).

2.2 Sistemas de Controle de Vibrações

Os sistemas de controle de vibrações têm por objetivo reduzir as amplitudes de vibração, através da instalação de dispositivos externos, os quais aumentam o amortecimento da estrutura.

De acordo com Paredes, 2008, nas últimas três décadas, observa-se um grande desenvolvimento de técnicas para controle de vibrações devidas a ações aleatórias, como o vento e os sismos, os quais são imprevisíveis.

Segundo Ospina, 2008, os sistemas de controle podem ser classificados em quatro categorias: passivo, ativo, semi-ativo e híbrido.

2.2.1 Sistemas Passivos

Os sistemas de controle passivos são dispositivos compostos por uma massa ligada através de uma mola e um amortecedor à estrutura, para que parte da energia fornecida pela estrutura seja absorvida e dissipada neste dispositivo, sem a necessidade adicional de energia ou controle externo. Desta forma, são vantajosos sob os sistemas ativos, por razões de custo, instalação, manutenção e facilidade de controle.

Segundo Ospina, 2008, estes dispositivos dissipam a energia através de seu movimento próprio, convertendo a energia do movimento em calor.

Segundo Paredes, 2008, e Ospina, 2008, são exemplos de sistemas de controle passivos os isoladores de base, os amortecedores: de massa sintonizada (AMS), de líquidos sintonizados (ALS), metálicos, viscosos, visco elásticos, visco fluídos e por atrito.

Segundo Nagahama, 2013, os sistemas passivos com amortecedores de massa sintonizados podem ser compostos por um ou mais dispositivos independentes. Quando são compostos por um único dispositivo, são denominados AMS, já quando são compostos por mais de um dispositivo, sendo múltiplos AMS, são denominados MAMS.

2.2.2 Sistemas Ativos

Os sistemas de controle ativos, como o próprio nome já diz, são dispositivos que demandam de energia e controle externo para o bom desempenho. Esta energia e controle externo são obtidos através de algoritmos, os quais são alimentados, por sensores instalados na estrutura. Estes algoritmos calculam e aplicam a força necessária para controlar ou anular as forças devidas as excitações. As forças são introduzidas na estrutura através de macaco hidráulico, motor elétrico, entre outros.

Estes sistemas possuem a vantagem de se adaptarem a diferentes tipos de cargas e ações, mas, demandam grande quantidade de energia para atuarem de forma a garantir a estabilidade à estrutura, podendo em muitos casos ocasionar a instabilidade da estrutura.

Segundo Ospina, 2008, são exemplos destes dispositivos os materiais inteligentes, amortecedores de massa ativos, contraventamento ativo, geradores de pulso, apêndices aerodinâmicos e os cabos tensionados.

2.2.3 Sistemas Semi-Ativos

Os sistemas de controle semi-ativos, segundo Chaves, 2010, são intermediários aos sistemas ativos e passivos, sendo chamados de “passivos inteligentes”. Esta denominação é devida ao fato de que dissipam a energia conforme os sistemas passivos, através da movimentação da estrutura e dissipação desta energia, no entanto, possuem maior adaptabilidade, pois têm a capacidade de se ajustarem de acordo com a resposta da estrutura, tais como os sistemas ativos.

Sua principal vantagem é de que se adaptam as respostas da estrutura sem demandar muita energia externa. Por este motivo são mais efetivos e confiáveis comparados aos sistemas passivos e ativos. São denominados controles passivos controláveis.

Conforme Nagahama, 2013, estes dispositivos não adicionam energia mecânica ao sistema, mas a estrutura necessita ser sensoriada. As forças de controle são adicionadas através da modificação das características de rigidez e amortecimento destes dispositivos de acordo com regras predeterminadas.

São exemplos deste tipo de controle de vibrações os dispositivos de rigidez variável, amortecedores de atrito variável, amortecedores viscosos de orifício variável e amortecedores de viscosidade.

2.2.4 Sistemas Híbridos

Os sistemas de controle híbridos são uma combinação dos sistemas ativos e passivos. Possuem tanto atuadores, como dissipadores de energia. O sistema ativo só entrará em funcionamento, quando a resposta da estrutura for superior a capacidade de dissipação de energia através do controle passivo. Uma grande vantagem sob o sistema de controle ativo é de que como uma parcela da energia é dissipada por um sistema passivo, a energia externa demandada em um sistema híbrido é menor comparada ao ativo, o que gera uma redução considerável no custo, e uma maior confiabilidade. Outra vantagem deste dispositivo é que com a combinação de sistemas ativos e passivos, há uma amplificação na faixa de frequência de atuação do dispositivo, gerando um melhor desempenho.

No caso de falta de energia, o seu componente passivo ainda oferece certo grau de proteção à estrutura. Portanto, supre as principais desvantagens dos controles passivo e ativo isoladamente [Ospina, 2008].

Neste grupo os mais conhecidos são os HMD's (*Hybrid Mass Dampers*) que fazem uma combinação de AMS's com sistemas ativos, através da exploração do efeito passivo dos AMS's e a implementação de um sistema ativo paralelo que aumenta o desempenho do aparelho, aumentando o movimento da massa passiva e aumentando a robustez do dispositivo em face de problemas de sintonização [Chaves, 2010].

2.3 Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS)

Segundo Ormondroyd e Den Hartog, 1928, a aplicação de sistemas de controle foi proposta pela primeira vez em 1909.

A invenção de sistemas de amortecimento de vibrações foi proposta em 1909, pelo engenheiro do império alemão, Hermann Frahm, o qual patenteou seu invento em 1911, conforme Frahm, 1911. Frahm criou o primeiro AMS, constituído por elementos de rigidez e de massa, sem amortecimento. Este sistema de controle foi criado devido as vibrações que surgem em sistemas sujeitos a impactos periódicos. As vibrações foram por ele denominadas de “vibrações de ressonância”. Sendo estas vibrações provenientes de navios submetidos a forças periódicas de propulsão ou de suas hélices. Não se limitando somente a navios, mas também a toda e qualquer estrutura, como aviões, veículos ferroviários, veículos rodoviários, edifícios com equipamentos trabalhando em seu interior, bem como, veículos passando perto destes edifícios. Estas vibrações podem ser insuportáveis tanto para pessoas, quanto para a própria estrutura, impossibilitando muitas vezes o trabalho.

O amortecedor de massa sintonizado (AMS) é um dispositivo passivo de controle de vibrações, composto por uma massa, ligado à estrutura através de uma mola e um amortecedor. O AMS é usualmente instalado no topo da estrutura com o objetivo de atenuar as vibrações devidas ao primeiro modo que é o de maior predominância na ocorrência na geração de problemas em estruturas. A frequência natural do AMS é sintonizada em torno da frequência do primeiro modo de vibração. Quando a estrutura vibra, o AMS vibra com a mesma frequência e absorve parte da energia do sistema. Desta forma, a estrutura terá outra frequência natural, deixando de estar na faixa de frequência de vibração da excitação e ocorrência de ressonância, assim a resposta da estrutura em termos de deslocamentos e acelerações é reduzida.

Desde a invenção desenvolvida por Frahm, diversas pesquisas estão sendo feitas para investigar a eficácia dos AMS para diferentes aplicações de cargas dinâmicas.

Durante anos Soong e Dargush, 1997 realizaram uma extensiva pesquisa para o sistema de controle passivo através de AMS visando o controle de vibrações em estruturas lineares e não lineares submetidas a excitações de cargas de vento e terremotos.

Devido ao inconveniente do grande valor e tamanho da massa do AMS, Xu e Igusa, 1992, propuseram a aplicação de múltiplos AMS (MAMS), sendo cada um dos AMS's

instalados individualmente, reduzindo o espaço e a carga em um único local e garantindo a sintonização de cada AMS a um modo em específico.

Para verificação do desempenho e eficácia dos MAMS frente às excitações de vento e terremoto, Kareem e Klein, 1995, concluíram que o desempenho depende do número total de AMS, distribuição destes AMS ao longo da estrutura, a respectiva taxa de amortecimento e das frequências adotadas para o dimensionamento dos MAMS.

Conforme Battista, 2004 um sistema de múltiplos AMS's foi instalado na Ponte Rio-Niterói para evitar grandes amplitudes de oscilações induzidas por desprendimento de vórtices causadas por ventos com velocidades relativamente baixas. A estrutura da ponte é composta por vigas metálicas tipo caixão de pequena esbeltez, possuindo extensão de 13,3km, sendo a ponte com o maior vão do mundo (300 metros), a qual apresentava um comportamento aeroelástico no vão central. Com a incidência de ventos da ordem de 55 a 60km/h ocorriam oscilações com a amplitude de 60cm para baixo e 60cm para cima. Apesar de não oferecer risco à estrutura, a incidência do vento causava muito desconforto aos usuários. Para controle dinâmico, reabilitação da funcionalidade da ponte, além de segurança e conforto dos usuários, foram implantados AMS's na estrutura da ponte, desenvolvido através de um modelo matemático do problema aeroelástico, combinado com resultados de medições experimentais e técnicas de otimização. O desempenho do sistema implantado é verificado através de medições experimentais e comparações com os resultados numéricos obtidos para respostas da estrutura original e controlada. Um vídeo ilustrativo do problema e solução pode ser visto através do link: <https://www.youtube.com/watch?v=mOsazjJkqCc>.

AMS's foram instalados em prédios altos para redução das vibrações devidas ao vento e dança. Como exemplos citam-se: a torre *John Hancock* de 244 metros de altura em Boston, com AMS composto por dois blocos de chumbo e aço de $2,7 \times 10^5$ kg; O *Citicorp Center* prédio de escritórios de 280 metros de altura em Nova Iorque com um AMS composto por um bloco de concreto de $3,6 \times 10^5$ kg, ambos para vento. Para controle de vibrações devidas a dança cita-se o AMS instalado no *Terrace on the Park Building* na cidade de Nova Iorque.

O desempenho do AMS depende de seus parâmetros, como massa, rigidez e amortecimento, e diversos métodos estão sendo pesquisados e propostos para determinação dos valores ótimos visando à obtenção da menor resposta da estrutura em termos de deslocamentos e acelerações. Estes variam conforme os critérios de concepção e alguns são baseados na relação de massas levando em consideração a frequência natural e razão de amortecimento da

estrutura e do AMS, já outros métodos utilizam-se de uma faixa de relação de massas, rigidez e amortecimento, diretamente.

Um único AMS pode ser eficaz na redução da resposta da estrutura submetida a excitações externas, mas muitas vezes a sintonização da frequência do AMS gera alguns inconvenientes, como por exemplo, quando estruturas estão submetidas ao vento e a terremotos, devido à dificuldade de sintonização da excitação com a frequência natural da estrutura. Desta forma há a possibilidade de instalação de diversos AMS (MAMS), no qual cada AMS será sintonizado a uma frequência específica da estrutura.

Uma das desvantagens na aplicação prática de um AMS é quando a massa necessária para a redução da resposta da estrutura for relativamente grande, o que demanda um espaço considerável para instalação, bem como, a estrutura deverá suportar esta massa como uma carga adicional. Outra desvantagem de um único AMS é que a frequência de sintonização se dá somente para um modo, geralmente o primeiro, o que por consequência acarreta em não controlar os modos mais elevados da estrutura.

Conforme Xu e Igusa, 1992, o uso de MAMS com a sintonização de frequências naturais diferentes e distribuídas com pequenos intervalos pode ser mais eficaz do que um único AMS.

Enquanto um único AMS é instalado geralmente no topo da estrutura, os múltiplos AMS podem ser instalados em diferentes configurações, podendo ser instalados em paralelo, em série, em um único andar, ou distribuídos ao longo dos andares de um edifício.

Warburton, 1982, utiliza valores para a relação de massas de 0,01 a 0,2, ou seja, estipula o limite superior em 20% para a massa do AMS quando comparada a massa da estrutura.

Sadek et al., 1997, adotam limites mínimo e máximo para a relação de massas variando de 0 a 0,15, com incremento de 0,005.

Estudos mais recentes como o de Ferreira, 2008, consideram valores para a relação de massas de 0,005 a 0,01.

Sabe-se que quanto maior a relação de massas entre o AMS e a estrutura, maior será o valor da massa do AMS. No entanto, o valor da massa do AMS não é interessante que seja um muito alto, visto que acarretará em carga adicional à estrutura em análise, tornando-se inviável, devido ao custo e à dificuldade de implantação.

2.4 Otimização

Otimização é o termo usado frequentemente para minimizar ou maximizar uma função. Em geral utiliza-se o termo de minimização. Pois, maximização de $F(x)$ é alcançada através da minimização de $-F(x)$.

Otimização é um grande tópico e existem vários livros dedicados a ele. Por ser uma área de estudo relativamente nova, está sujeita a desenvolvimentos constantes, em seus métodos e objetivos.

Em virtude do desenvolvimento constante e a busca por eficiência e competitividade na redução de custo e peso em projetos estruturais, estão sendo cada vez mais aplicados métodos de otimização em busca do melhor projeto, nos quais pode-se citar aplicações nas áreas aeroespacial, projetos de equipamentos, automotiva, entre outras áreas da engenharia.

Alguns métodos básicos de otimização são bons o suficiente para problemas que são razoavelmente bem suportados e não envolvem muitas variáveis de projeto. Todos os algoritmos de otimização não são eficazes para um grau qualquer. Um deles pode ser eficaz em um problema e em outro não. Usualmente se ganha eficiência computacional, mas não necessariamente a confiabilidade.

Os algoritmos são classificados em algoritmos determinísticos, que utilizam a informação do gradiente, ou seja, usam os valores das funções e suas derivadas, e os metaheurísticos, que são métodos probabilísticos não baseados em gradiente, ou seja, usam somente a avaliação da função objetivo.

Conforme explicado anteriormente, existem muitos estudos sobre AMS, porém poucos utilizam algoritmos de otimização para determinar os parâmetros ótimos de cada amortecedor. A seguir apresentam-se alguns algoritmos de otimização que podem ser utilizados para resolver o problema de otimização de MAS, bem como, alguns trabalhos em que algoritmos de otimização são usados para projetos de AMS.

Como exemplos de algoritmos metaheurísticos clássicos podem-se citar: *Genetic Algorithms*, *Particle Swarm Optimization*, *Harmony Search* e *Ant Colony Optimization*. Destaca-se como algoritmos metaheurísticos desenvolvidos e bastante difundidos mais recentes: *Big Bang-Big Crunch Algorithm*, *Ray Optimization*, *Imperialist Competitive Algorithm*, *Mine Blast Algorithm*, *Firefly Algorithm*, *Bat-Inspired Algorithm*, *Cuckoo Search*

Algorithm, Dolphin Echolocation, Teaching-Learning-Based Optimization, Chaotic Swarming of particles, Colliding Bodies optimization, entre outros.

Como pôde ser visto, existe uma infinidade de algoritmos, e a todo o momento novos métodos estão sendo desenvolvidos. Neste contexto, podem-se citar o *Backtracking Search Optimization Algorithm* (BSA) desenvolvido em 2013, e o *Search Group Algorithm* (SGA) desenvolvido em 2015 por pesquisadores do CORE da UFSC, Brasil (Gonçalves et al., 2015).

Li (2002), estudou a performance de 5 combinações diferentes dos parâmetros do AMS (massa, rigidez e amortecimento) enquanto o critério de otimização era maximizar o fator dinâmico de deslocamento (DDMF) e maximizar o fator dinâmico de aceleração (ADMF) em uma estrutura submetida a aceleração do solo.

Conforme Mohebbi et al., 2012, nas pesquisas anteriores sobre os sistemas de AMS's diferentes objetivos foram considerados em MAMS projetando como minimizar o deslocamento de estado estacionário do sistema principal, sob excitação harmônica [Jangid, 1999]; minimizando a aceleração máxima da estrutura sob uma carga sísmica estocástica [Chen e Wu, 2001]; minimização do DDMF e ADMF [Li, 2002]; um índice de desempenho quadrático [Hoang e Wartchai, 2005]; otimizando não uniformes MAMS usando um método de otimização baseado em gradiente para minimizar o deslocamento máximo da estrutura principal sob excitação harmônica [Li e Ni, 2007]; etc...

De acordo com Miguel et al., 2016, Joshi e Jangid, 1997, realizaram um estudo para determinar os parâmetros ótimos de MAMS em estruturas SDOF submetidos a uma excitação de base, que é modelado como um processo aleatório estacionário de ruído branco. Hadi e Arfiadi, 1998, discutiram a projeção ótima dos AMS individuais em estruturas MDOF submetidas à excitação sísmica.

Chen e Wu, 2001, apresentaram um estudo focado no posicionamento ideal de MAMS em estruturas sujeitas a excitações sísmicas. Bandivadekar e Jangid, 2013, empregaram uma técnica de busca numérica para otimizar os parâmetros de MAMS para suprimir a resposta dinâmica de um sistema amortecido SDOF principal sujeito a excitação harmônica.

Segundo Miguel et al., 2016, poucos artigos são encontrados abordando projeto robusto, considerando a incerteza nos parâmetros do sistema ou do AMS, para controle de vibração estrutural. Mesmo considerando os recentes desenvolvimentos, as perguntas ainda surgem, principalmente em causa da otimização global de MAMS e sua melhor configuração na estrutura, incluindo a distribuição horizontal e vertical. No artigo apresentado por Miguel et al.,

2016 é considerado a utilização de dois algoritmos de otimização para a determinação dos parâmetros ótimos do AMS, sendo o Algoritmo *Firefly* usado na parte estocástica, ou seja, na busca global de otimização, e o *Nelder-Mead Algorithm (NMA)* usado na busca local, para acelerar a busca da convergência, reduzindo o tempo computacional.

Mohebbi et al., 2012, cita que em pesquisas anteriores, diferentes funções foram consideradas a serem minimizadas como função objetivo. No entanto, em todas as pesquisas, o objetivo principal tem sido a melhoria do desempenho da estrutura em relação aos critérios de segurança e manutenção. Mohebbi et al., 2012 utilizam o algoritmo genético (GAs) para a busca dos parâmetros ótimos de múltiplos AMS, na busca de atenuar a resposta sísmica de estruturas.

Hadi et al., 1998, busca os parâmetros ótimos de um AMS para uma estrutura de múltiplos graus de liberdade submetida à excitação sísmica através do algoritmo genético (GA).

Bekdas et al., 2011, estimam os parâmetros ótimos como massa, rigidez e amortecimento de um amortecedor de massa sintonizado (AMS), a ser instalado no topo da estrutura, através da utilização do algoritmo *Harmony Search (HS)*, para uma estrutura sujeita à excitação sísmica. Entretanto, deve-se ressaltar que segundo Miguel et al., 2013, há erros no trabalho de Bekdas et al., 2011.

Os algoritmos de minimização são procedimentos iterativos que necessitam de valores iniciais da variável x . Se $F(x)$ tem vários mínimos locais, a escolha inicial de x influenciará qual deles será calculado.

Conforme Jaan, 2005, os projetos são submetidos às restrições ou limitações, que podem ter a forma de igualdades ou desigualdades.

No entanto, a maioria dos projetos de otimização são feitos sem restrições, no qual nenhuma limitação é adotada nas variáveis de projeto.

Conforme Borges, 2013, as vantagens dos algoritmos probabilísticos em relação aos determinísticos são:

- A função objetivo e as restrições não precisam, necessariamente, ter uma representação matemática;
- Não requerem que a função objetivo seja contínua ou diferenciável;
- Trabalham adequadamente, tanto com parâmetros contínuos quanto com discretos, ou ainda com uma combinação deles;
- Não necessitam de formulações complexas ou reformulações para o problema;

- Não há restrição alguma quanto ao ponto de partida dentro do espaço de busca da solução;
- Realizam buscas simultâneas no espaço de possíveis soluções através de uma população de indivíduos, sendo, portanto, candidatos à utilização de paralelização em computadores;
- Otimizam um grande número de variáveis, desde que a avaliação da função objetivo não tenha um custo computacional demasiadamente alto;

A maior desvantagem dos métodos probabilísticos em relação aos métodos determinísticos é o custo computacional.

Em problemas de otimização tem-se conceitos básicos como: variáveis de projeto, função objetivo e restrições.

- As variáveis de projeto são os parâmetros do problema que podem ser alterados para otimizar o sistema. Estas podem ser classificadas em discretas e contínuas. De acordo com Borges, 2013, as variáveis contínuas podem assumir qualquer valor real, enquanto que as variáveis discretas são limitadas a valores predefinidos.
- A função objetivo quantifica o que se está otimizando e será uma medida da eficiência do projeto.
- As restrições são os limites impostos ao problema de otimização, e estas podem ser classificadas em lateral, desigualdade ou igualdade.

A formulação de um algoritmo de otimização é dada por:

Encontrar x_i tal que

$$\min f(x_i)$$

respeito a

$$h_k(x_i) = 0$$

$$g_j(x_i) \geq 0$$

onde $f(x)$ é a função objetivo, x é a variável de projeto, $h_k(x) = 0$ e $g_j(x) \geq 0$ se referem às restrições.

3 MÉTODOS UTILIZADOS

3.1 Auto Correlação

A função de autocorrelação para um processo aleatório $x(t)$ é definida como o valor médio do produto $x(t)x(t+\tau)$. O processo é amostrado no tempo t , e novamente em seguida no tempo $t+\tau$ através da função definida por Newland (1987):

$$R_x(\tau) = x(t)x(t+\tau) \quad (3.1)$$

A autocorrelação é a correlação cruzada de um sinal com o próprio sinal. É utilizado para encontrar padrões de repetição. Normalmente é utilizado para processos de sinais para avaliação de funções de série de valores, em sinais no domínio do tempo.

Segundo a definição da estatística, o valor da autocorrelação está entre 1 (correlação perfeita) e -1, o que significa anti-correlação perfeita. O valor 0 significa total ausência de correlação.

3.2 Densidade Espectral

A densidade espectral é uma função real positiva de uma frequência variável associada com um processo estocástico, ou uma função determinística do tempo, sendo chamada de espectro do sinal.

Ao efetuar-se a análise da composição de frequências de um processo aleatório natural, de acordo com Newland, 1987, verifica-se que o histórico de uma função no tempo de $x(t)$ não é periódico, conseqüentemente não pode ser representado por uma série de Fourier discreta. Esta dificuldade pode ser superada analisando não somente amostras de funções do processo, mas sua função de correlação $R_x(\tau)$.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (3.2)$$

A lógica por trás deste raciocínio é que a função de autocorrelação dá informações sobre as frequências presentes de um processo aleatório indiretamente.

A função $R_x(\tau)$ tem seu máximo quando os valores de τ cujos $x(t)$ e $x(t+\tau)$ estão em fase e um mínimo para valores de τ para os quais eles estão em anti-fase, para um mesmo instante t , segundo Newland, 1987. Logo, as frequências presentes no gráfico de $R_x(\tau)$ versus τ refletem o conteúdo de frequências de amostras de funções do processo randômico $x(t)$. Se o valor inicial do processo aleatório $x(t)$ for normalizado (ou ajustado) de modo que o valor médio do processo $m=E[x]$ seja zero, então assumindo que $x(t)$ não tenha componentes periódicos,

$$R_x(\tau \rightarrow \infty) = 0 \quad (3.3)$$

e a condição da equação 3.4 é satisfeita

$$\int_{-\infty}^{\infty} |R_x(\tau)| d\tau < \infty \quad (3.4)$$

Ainda segundo Newland, 1987, é possível calcular a transformada de Fourier da função de autocorrelação $R_x(\tau)$ e sua inversa, através das equações 3.5 e 3.6:

$$S_x(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-iwt} d\tau \quad (3.5)$$

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(w) e^{iwt} d\omega \quad (3.6)$$

onde $S_x(w)$ é a chamada densidade espectral do processo x e é uma função da frequência angular w . Quando se adota $\tau=0$ na equação 3.6, tem-se a propriedade mais importante de $S_x(w)$, a qual é apresentada na equação 3.7:

$$R_x(\tau=0) = \int_{-\infty}^{\infty} S(w) d\omega \quad (3.7)$$

através da definição fundamental de $R_x(\tau)$ apresentada na equação 3.1:

$$E[x^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S(w) d\omega \quad (3.8)$$

O valor quadrático médio de um processo aleatório estacionário x é então dado pela área sobre o gráfico da função densidade espectral $S_x(w)$ versus w , conforme a Figura 3.1

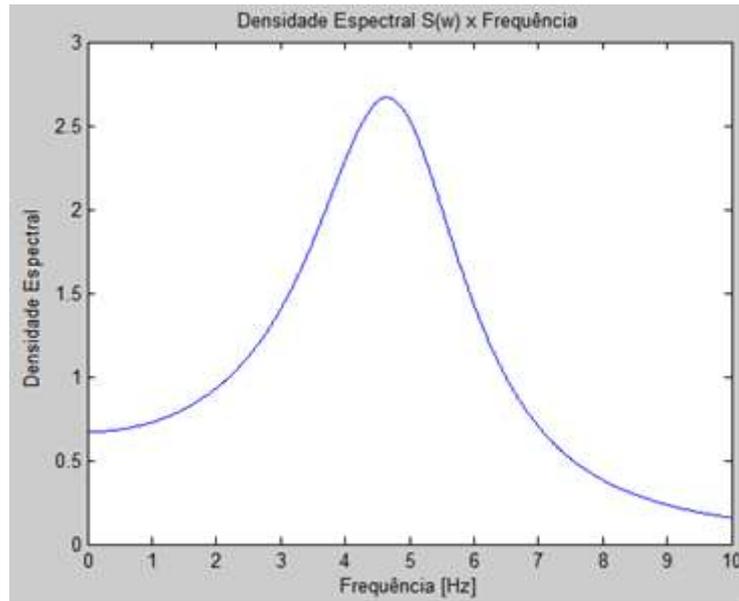


Figura 3.1 – A área sob a curva da densidade espectral é igual a $E[x^2]$

A transformada de Fourier pode ser expressa em termos de suas partes real e imaginária, segundo Newland, 1987, que são dadas por:

$$S_x(\omega) = A(\omega) - iB(\omega) \quad (3.9)$$

onde

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cos \omega\tau \, d\tau \quad (3.10)$$

e

$$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \sin \omega\tau \, d\tau \quad (3.11)$$

Desde que $R_x(\tau)$ é uma função par de τ enquanto $\sin \omega\tau$ é uma função ímpar, o produto $R_x(\tau) \sin \omega\tau$ é ímpar e sua integral de $-\infty$ a 0 é exatamente igual e oposta da integral de 0 a ∞ . $B(\omega)$ é então zero e

$$S_x(\omega) = A(\omega) \quad (3.12)$$

o que, pela equação 3.10, é uma função real par de ω . Além disso, pode ser demonstrado que $S_x(\omega)$ não é negativo, o que é suportado pela equação 3.8. Portanto, a densidade espectral média quadrática do processo aleatório estacionário $x(t)$ é uma função par real e não negativa de ω .

3.3 Geração do Sinal de Excitação

Por ser um método bastante utilizado, nesta dissertação optou-se por gerar um sismo artificial através do espectro proposto por Kanai, 1961, e Tajimi, 1961, popularmente conhecido como espectro de Kanai-Tajimi.

O espectro de Kanai-Tajimi é dado pela seguinte equação:

$$S(\omega) = S_0 \left[\frac{\omega_g^4 + 4\omega_g^2 \zeta_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\omega_g^2 \zeta_g^2 \omega^2} \right] \quad (3.13)$$

$$S_0 = \frac{0,03 \zeta_g}{\pi \omega_g (4\zeta_g^2 + 1)} \quad (3.14)$$

onde S_0 é a densidade espectral constante, ζ_g é o amortecimento do solo, e ω_g é a frequência natural do solo.

Para passar o sinal para o domínio do tempo, pode-se utilizar o método proposto por Shinozuka e Jan, 1972, através da seguinte equação:

$$\vec{x}_g(t) = \sum_{k=1}^n \sqrt{2S_w(f_k) \Delta f_k} \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (3.15)$$

onde ϕ_k é o ângulo de fase aleatório, com distribuição uniforme, variando de 0 a 2π , e a banda de frequências é dividida em n intervalos.

O sinal sísmico de aceleração do solo gerado, deve ser normalizado pelo pico de aceleração do solo (PGA – *peak ground acceleration*).

3.4 Resposta Dinâmica da Estrutura

A resposta dinâmica de uma estrutura com vários graus de liberdade, submetida a uma aceleração na base, é dada pelo sistema de equações diferenciais do movimento, através da equação:

$$[M]\ddot{\vec{x}}(t) + [C]\dot{\vec{x}}(t) + [K]\vec{x}(t) = -[M]\ddot{\vec{x}}_g(t) \quad (3.16)$$

onde:

$[M]$ é a matriz de massa do sistema

$[C]$ é a matriz de amortecimento do sistema

$[K]$ é a matriz de rigidez do sistema

t é o tempo

$\ddot{\vec{x}}(t)$ é o vetor de aceleração do sistema, em função do tempo

$\dot{\vec{x}}(t)$ é o vetor de velocidade do sistema, em função do tempo

$\vec{x}(t)$ é o vetor de deslocamento do sistema, em função do tempo

$\ddot{\vec{x}}_g$ é a aceleração do solo

$-[M]\ddot{\vec{x}}_g(t)$ é a força (\vec{F}) devida a aceleração do solo

Através da análise modal efetua-se o cálculo das frequências naturais da estrutura, as quais serão utilizadas posteriormente para a determinação dos parâmetros ótimos do amortecedor de massa sintonizado (AMS).

3.5 Método Newmark

Os métodos de integração numérica direta são classificados em implícitos e explícitos. Estes métodos consistem em procedimentos numéricos que não requerem o cálculo prévio dos autovalores e autovetores da estrutura. As funções que representam a variação de velocidade e deslocamento dentro do intervalo de tempo Δt são obtidas através da integração da função que representa a variação da aceleração dentro do mesmo intervalo de tempo Δt . A convergência e a exatidão da solução, dependem da capacidade da função adotada para representar a aceleração com precisão dentro de cada intervalo de tempo Δt , e também do tamanho do intervalo.

Segundo Groehs, 2001, o método de Newmark é o mais eficaz dos métodos implícitos, que utilizam a equação do movimento no instante $t+\Delta t$ para calcular a resposta neste mesmo instante. As equações que representam a variação de deslocamento, da velocidade e aceleração no instante $t+\Delta t$, são dadas pelas equações 3.17, 3.18 e 3.19 respectivamente:

$$\vec{x}(t_{i+1}) = (a_0[M] + a_5[C] + [K])^{-1} \{ \vec{F}(t_{i+1}) + [M][a_0\vec{x}(t_i) + a_1\dot{\vec{x}}(t_i) + a_2\ddot{\vec{x}}(t_i)] + [C][a_5\vec{x}(t_i) + a_6\dot{\vec{x}}(t_i) + a_7\ddot{\vec{x}}(t_i)] \} \quad (3.17)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6\dot{\vec{x}}(t_i) - a_7\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (3.18)$$

$$\ddot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_0[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1\dot{\vec{x}}(t_i) - a_2\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (3.19)$$

onde os vetores $\vec{x}(t_{i+1})$, $\dot{\vec{x}}(t_{i+1})$, $\ddot{\vec{x}}(t_{i+1})$ representam o deslocamento, a velocidade e a aceleração no tempo $t+\Delta t$, e os vetores $\vec{x}(t_i)$, $\dot{\vec{x}}(t_i)$, $\ddot{\vec{x}}(t_i)$ representam os deslocamento, a velocidade e a aceleração no tempo t , respectivamente.

As constantes “a” são parâmetros do método de Newmark dados pelo conjunto de equações 3.20:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\alpha\Delta t^2}, \quad a_1 = \frac{1}{\alpha\Delta t}, \quad a_2 = \frac{1}{2\alpha} - 1, \quad a_3 = (1-\delta)\Delta t \\ a_4 &= \delta\Delta t, \quad a_5 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}, \quad a_6 = \frac{\delta}{\alpha} - 1, \quad a_7 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Os parâmetros α e δ são incondicionalmente estáveis para valores de $\alpha=0,5$ e $\delta=0,25$. Para o primeiro passo de tempo, os vetores deslocamento e velocidade devem ser conhecidos. O vetor aceleração inicial é dado pela equação 3.21:

$$\ddot{\vec{x}}(t_0) = [M]^{-1} [\vec{F}(t_0) - [C]\dot{\vec{x}}(t_0) - [K]\vec{x}(t_0)] \quad (3.21)$$

3.6 Dimensionamento de Um Único AMS pelo Método de Villaverde

A determinação dos parâmetros ótimos para instalação do AMS depende do tipo de ação à qual a estrutura está sujeita. Para a ação sísmica cita-se o método de Villaverde, 1980, Villaverde, 1985, no qual o dimensionamento deve satisfazer a equação 3.22:

$$|\zeta_s - \zeta_T| = |\vec{\Phi}_m \sqrt{\mu}| \quad (3.22)$$

onde ζ_s é o amortecimento da estrutura; ζ_T é o amortecimento do AMS, o qual deverá ser escolhido o maior possível, devendo ficar abaixo do amortecimento crítico, para que ocorra a dissipação de energia, caso contrário não ocorrerá oscilação do AMS; $\vec{\Phi}_m$ é o modo de vibração,

a qual se deseja efetuar o controle de amplitudes; e μ é a relação de massas, e é definida através da equação 3.23:

$$\mu = \frac{m_T}{m_s} \quad (3.23)$$

onde m_T é a massa do AMS, e m_s é a massa da estrutura.

Conforme Paredes, 2008, o dimensionamento de um AMS é feito através de um sistema dinâmico de um modo de vibração, ou seja, um grau de liberdade (GDL). No entanto, as estruturas reais possuem vários GDL, ou seja, vários modos de vibração. Assim para que o método seja válido, os modos de vibração devem ser normalizados, de forma a possuírem fatores de participação unitários. Para ações sísmicas, a normalização é feita com fatores de participação (F_j), dado por:

$$F_j = \frac{L_j}{M_j} \quad (3.24)$$

onde L_j é o fator modal de participação sísmica do modo j :

$$L_j = \vec{\Phi}_j^T [M] \{1\} \quad (3.25)$$

onde $\vec{\Phi}_j$ é o modo de vibração já normalizado; $[M]$ é a matriz de massa da estrutura; e $\{1\}$ é um vetor coluna com dimensões $n \times 1$, n é o número total de GDL da estrutura, e 1 significa que todos os valores do vetor possuem valor iguais a unidade (1).

A massa modal do sistema é dada por

$$M_j = \vec{\Phi}_j^T [M] \vec{\Phi}_j \quad (3.26)$$

Para que o fator de participação seja unitário, é necessário resolver a equação 3.27, a qual consiste em descobrir qual o valor da constante β_j , a qual multiplicada por $\vec{\Phi}_j$, nos fornece o vetor normalizado do fator de participação unitário φ_j

$$\frac{(\beta_j \vec{\Phi}_j) [M] \{1\}}{(\beta_j \vec{\Phi}_j^T) [M] (\beta_j \vec{\Phi}_j)} = 1 \quad (3.27)$$

Isolando β_j :

$$\beta_j = \frac{(\vec{\Phi}_j) [M] \{1\}}{(\vec{\Phi}_j^T) [M] (\vec{\Phi}_j)} \quad (3.28)$$

Chega-se à solução:

$$\vec{\varphi}_j = \beta_j \vec{\phi}_j = F_j \vec{\phi}_j \quad (3.29)$$

3.7 Dimensionamento de Múltiplos AMS

Múltiplos AMS são dispostos na estrutura conforme a necessidade, como previamente mencionado. De acordo com Miguel et al., 2016, a distribuição dos MAMS é feita na estrutura de forma vertical e horizontal, a qual é apresentada na Figura 3.2.

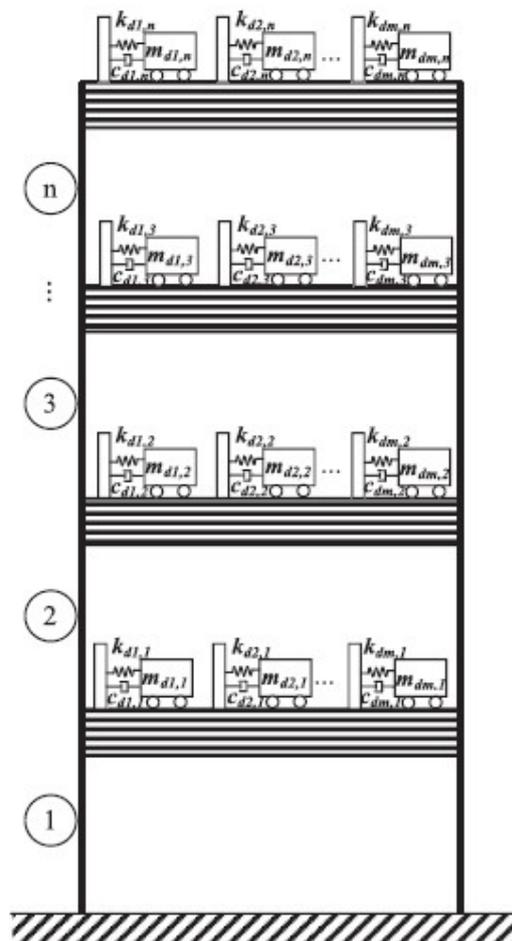


Figura 3.2 – Edifício de n-graus de liberdade com MAMS horizontalmente e verticalmente distribuídos ao longo da estrutura – Fonte Miguel et al., 2016

A determinação dos parâmetros ótimos para instalação dos MAMS, como massa, rigidez e amortecimento, é feita através da utilização dos algoritmos de otimização previamente mencionados.

Para tanto, é necessária a montagem das matrizes de massa, rigidez e amortecimento da estrutura com os amortecedores acoplados. A matriz de rigidez é apresentada na equação 3.30. A matriz de amortecimento apresenta procedimento análogo ao da matriz de rigidez. Já a matriz de massa é diagonal, e cada massa do AMS ocupa uma posição na diagonal principal.

$$\begin{pmatrix}
 k_1 + k_2 + \sum_{i=1}^{N_{AMS}^{1stFloor}} k_{d1i} & -k_2 & \dots & 0 & -k_{d11} & -k_{d12} & \dots & -k_{d1n} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 -k_2 & k_2 + k_3 + \sum_{i=1}^{N_{AMS}^{2ndFloor}} k_{d2i} & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & -k_{d2} & -k_{d22} & \dots & -k_{d2n} & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 0 & 0 & \dots & k_n + \sum_{i=1}^{N_{AMS}^{ndFloor}} k_{dni} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & -k_{dn1} & -k_{dn2} & \dots & -k_{dnn} \\
 -k_{d11} & 0 & \dots & 0 & k_{d11} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 -k_{d12} & 0 & \dots & 0 & 0 & k_{d12} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 -k_{d1n} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & k_{d1n} & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 0 & -k_{d21} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & k_{d21} & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 0 & -k_{d22} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & k_{d22} & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & -k_{d2n} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & k_{d2n} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & -k_{dn1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & k_{dn1} & 0 & \dots & 0 \\
 0 & 0 & \dots & -k_{dn2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & k_{dn2} & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & -k_{dnn} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & k_{dnn}
 \end{pmatrix}
 \tag{3.30}$$

3.8 Algoritmos de Otimização Utilizados

Neste trabalho são adotados dois algoritmos para otimização dos parâmetros do AMS, sendo estes utilizados de forma independente, objetivando a comparação dos resultados, assim como o tempo computacional, quando adotados os mesmos parâmetros de projeto. Os algoritmos adotados são FA (*Firefly Algorithm*) e BSA (*Backtracking Search Optimization Algorithm*). Estes dois algoritmos são metaheurísticos.

3.8.1 Firefly Algorithm (FA)

Em otimização matemática, o algoritmo *Firefly* é um metaheurístico proposto por Xin-She Yang, 1965, e inspirado pelo comportamento de piscar de vaga-lumes. Com base nas características da luz dos vaga-lumes, desenvolve-se o algoritmo inspirado por vaga-lume. Yang cita três regras em otimizar o algoritmo *Firefly*.

- Todos os vaga-lumes são unissex, para que um vaga-lume seja atraído por outros vaga-lumes independentes de seu sexo;

- A atratividade é proporcional ao seu brilho, e para quaisquer dois vaga-lumes, o menos brilhante será atraído por o mais brilhante; No entanto, a intensidade diminui à medida que a sua distância mútua aumenta;
- O brilho de um vaga-lume é influenciada ou determinada pela forma da função objetivo.

Com base nestas três regras, a FA está apresentada brevemente através do pseudocódigo nos passos mostrados na Figura 3.3:

Início

- 1) Função objetivo: $f(x)$, $x=(x_1, x_2, \dots, x_d)$;
 - 2) Gerar população inicial de vagalumes x_i ($i=1,2,\dots,n$);
 - 3) Formular intensidade da luz I de modo a que ele está associado com $f(x)$
(por exemplo, para problemas de minimização, $I \propto f(x)$ ou simplesmente $I=f(x)$);
 - 4) Definir coeficiente de absorção γ
- While** ($t < \text{MaxGeração}$)
- for** $i = 1 : n$ (todos n vagalumes)
- for** $j = 1 : n$ (n vagalumes)
- if** ($I_j > I_i$),
- mover vagalume i em direção j ;
- variam atratividade com a distância r via $\exp(-\gamma r)$;
- Avaliar novas soluções e intensidade de atualização de luz;
- end if**
- end for** j
- end for** i
- Classificar vagalumes e encontrar o melhor atual;
- end while**
- Pós-processamento dos resultados e visualização;
- end**
-

Figura 3.3 - Pseudocódigo *Firefly Algorithm* [Adaptado de Xin_She Yang, 2009]

Em *Firefly Algorithm*, há duas questões importantes: a mudança na intensidade da luz e a formulação de atratividade. Para simplificar, supõe-se que a capacidade de atração de um vagalume é determinada pelo seu brilho o qual por sua vez está relacionado com a função objetivo, em que o brilho em um vagalume numa determinada posição x pode ser definido como $I(x) \propto f(x)$.

No entanto, a atração β é relativa, que pode ser vista pelo olho do observador ou julgado por outros vagalumes. Assim, ela variará com a distância r_{ij} entre o vaga-lume i e vaga-lume j .

Além disso, a intensidade da luz diminui com a distância a partir da sua fonte, e a luz é também absorvida no meio, então ele deve permitir a variação do grau de atração.

De forma simples, a intensidade da luz $I(r)$ varia de acordo com a lei do inverso do quadrado, como a Equação 3.31:

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (3.31)$$

I_s é a intensidade da luz na fonte. Para uma determinada forma, com um coeficiente de absorção de luz fixa γ a intensidade da luz I varia com a distância r , como na Equação 3.32.

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (3.32)$$

I_0 é a intensidade da luz na origem. Para evitar a singularidade em $r = 0$, na Equação 3.31, o efeito combinado de ambas a lei do inverso do quadrado e absorção pode ser aproximada pela forma Gaussiana na Equação 3.33.

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.33)$$

Como a atratividade do vagalume é proporcional à intensidade da luz visto por vagalumes adjacentes, define-se a atratividade β de um vagalume por

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.34)$$

β_0 é a atratividade em $r = 0$. Como é frequentemente mais rápido para calcular $1/(1+r^2)$ do que uma função exponencial, a função acima (equação 3.31), se necessário, pode ser convenientemente aproximada pela equação 3.35.

$$\beta = \frac{\beta_0}{1+\gamma r^2} \quad (3.35)$$

Ambas as equações 3.34 e 3.35 definem a distância característica:

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \quad (3.36)$$

Onde a atratividade muda significativamente de β for $\beta_0 e^{-1}$ na equação 3.34 ou $\beta_0/2$ na equação 3.35.

Na implementação real, a função atratividade $\beta(r)$ pode ser qualquer função monotonicamente decrescente, tal como a equação 3.37.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, \quad (m \geq 1) \quad (3.37)$$

O movimento de um vagalume i que é atraído por outro vagalume j mais atraente (mais brilhante) é determinado pela equação 3.38.

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \epsilon_i \quad (3.38)$$

onde o segundo termo é relativo a 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.

3.8.2 Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA)

O BSA é um novo algoritmo metaheurístico para resolver problemas de otimização numérica de valor real, desenvolvido em 2013 por Civicioglu. O BSA é considerado um algoritmo evolutivo (EA). Os EA's são populares algoritmos de busca estocástica os quais são amplamente utilizados para resolver problemas não lineares, de otimização numérica, não diferenciáveis e complexos. O desenvolvimento de BSA foi motivado por estudos visando desenvolver mais simples e eficazes algoritmos de busca. Ao contrário de muitos algoritmos de busca BSA tem um único parâmetro de controle. Além disso, o desempenho de BSA não é mais sensível ao valor inicial deste parâmetro. BSA tem uma estrutura simples e eficaz, rápida e capaz de desenvolver problemas multimodais e que lhe permite adaptar-se facilmente a diferentes problemas numéricos de otimização.

O BSA é um EA iterativo baseado na população concebido para ser um minimizador global. BSA pode ser explicado pela divisão de suas funções em cinco processos como é feito em outros EAs: inicialização-I, seleção, mutação, crossover e seleção-II.

A Figura 3.4 apresenta a estrutura geral do BSA.

```

1) Inicialização
Repeat
  Seleção-I
  Geração da população do ensaio
    2) Mutação
    3) Crossover
end
  Seleção-II
until estarem reunidas condições de parada

```

Figura 3.4 – Estrutura geral do BSA – Fonte adaptada de Civicioglu (2013)

3.8.2.1 Inicialização

BSA inicializa a população P com a equação 3.39

$$P_{i,j} \sim U(\text{low}_j, \text{up}_j), \quad (3.39)$$

para $i=1,2,3,\dots,N$ e $j=1,2,3,\dots,D$, quando N e D são o tamanho da população e a dimensão do problema, respectivamente, U é a distribuição uniforme e cada P_i é o objetivo individual na população P .

3.8.2.2 Seleção

A fase de seleção-I do BSA determina a histórica população *Old P* a ser utilizada para o cálculo da direção de busca. A população inicial de histórico é determinada usando a equação 3.40:

$$\text{Old } P_{i,j} \sim U(\text{low}_j, \text{up}_j), \quad (3.40)$$

BSA tem a opção de redefinir *Old P* no início de cada iteração através do "if-then" regra na equação 3.41:

$$\text{if } a < b \text{ then Old } P := P|_{a,b} \sim U(0,1), \quad (3.41)$$

onde: $=$ é a operação de atualização. Equação 3.43 garante que o BSA designa uma população pertencente a uma geração anterior selecionados aleatoriamente como a população histórica e lembra-se esta população histórica até ser alterada. Assim, o BSA tem uma memória.

Depois de *Old P* ser determinada, a equação 3.42 é utilizada para alterar aleatoriamente a ordem dos indivíduos em *Old P*:

$$\text{Old } P := \text{permutando } \text{Old } P, \quad (3.42)$$

A função de permutação utilizado na equação 3.42 é uma função de misturar aleatório.

3.8.2.3 Mutação

$$\text{Mutante} = P + F \cdot (\text{Old } P - P). \quad (3.43)$$

Na equação 3.43, F controla a amplitude da matriz de pesquisa (antiga *Old P* - P). Uma vez que a população de histórico é utilizada no cálculo da matriz de pesquisa, BSA gera uma população de teste, aproveitando uma parcela das suas experiências de gerações anteriores.

3.8.2.4 Crossover

O processo de *crossover* de BSA gera a forma final da população T do ensaio. O valor inicial da população do ensaio é mutante, tal como definido no processo de mutação. Indivíduos de teste com melhores valores de aptidão para o problema de otimização são usados para evoluir os indivíduos da população-alvo. O processo de *crossover* de BSA tem dois passos. O primeiro passo calcula uma matriz de valores inteiros binária (mapa) de tamanho $N \times D$ indica que os indivíduos de T para ser manipulado usando os indivíduos relevantes de P . Se $\text{mapa}_{n,m} = 1$, em que n pertence $\{1; 2; 3; \dots; N\}$ e m pertence $\{1; 2; 3; \dots; D\}$, T é atualizado com $T_{n,m} := P_{n,m}$.

Algoritmo 2 mostra a estratégia de *crossover* único do BSA na Figura 3.5.

```

Input: mutante, mixrate, N e D
Output:  $T$ :População do ensaio
map  $(1:N,1:D)=1$  // mapa inicial é uma matriz N-por-D de uns
if  $a < b$  |  $a, b \sim U(0,1)$  then
    for  $i$  from 1 to  $N$  do
        map  $_{i,u} (1:[mixrate.rns.D])=0$  |  $u = \text{permutando}((1,2,3,\dots,D))$ 
    end
else
    for  $i$  from 1 to  $N$  do, map  $_{i, \text{randi}(D)}=0$ , end
end
 $T := \text{Mutant}$  // Inicial  $T$ 
for  $i$  from 1 to  $N$  do
    for  $j$  from 1 to  $D$  do
        if  $\text{map}_{i,j} = 1$  then  $T_{i,j} := P_{i,j}$ 
    end
end

```

Figura 3.5 – Estratégia de *crossover* de BSA – Fonte adaptada de Civicioglu (2013)

Alguns indivíduos da população do ensaio obtido no final do processo de *crossover* do BSA podem transbordar os limites de busca do espaço permitido, como resultado da estratégia

de mutação do BSA. Os indivíduos além dos limites de busca de espaço são regenerados usando o algoritmo 3, apresentado na Figura 3.6.

```

Input:  $T$ , Search space limits (i.e.,  $low_j$ ,  $up_j$ )
Output:  $T$ 
for  $i$  from 1 to  $N$  do
  for  $j$  from 1 to  $D$  do
    if ( $T_{i,j} < low_j$ ) or ( $T_{i,j} > up_j$ ) then
       $T_{i,j} = \text{rnd} \cdot (up_j - low_j) + low_j$ 
    end
  end
end

```

Figura 3.6 – Mecanismo de controle de limite de BSA – Fonte adaptada de Civicioglu (2013)

3.8.2.5 Seleção-II

Na fase de seleção-II da BSA, o T_{is} que têm melhores valores de aptidão do que o P_{is} correspondentes são usados para atualizar o P_{is} com base em uma seleção ambiciosa. Se o melhor individual de P (P_{best}) tem um valor de fitness melhor do que o valor mínimo global obtido até agora pela BSA, o minimizador global é atualizado para ser P_{best} , e o valor mínimo global é atualizado para ser o valor de *fitness* de P_{best} . A estrutura do BSA é bastante simples; Assim é facilmente adaptado para diferentes problemas de otimização numérico. Na Figura 3.7 é apresentado o pseudocódigo do BSA.

```

Input: ObjFun, N, D, maxcycle, mixrate, low1:D, up1:D
Output: globalminimum, globalminimizer
//rnd~U(0,1), rndn~N(0,1), w=rndint(.,rndint(.)~U(1,.,))∈{1,2,3,...}
function bsa(ObjFun,N,D,maxcycle,low,up)
//INICIALIZAÇÃO
globalminimum=inf
for i from 1 to N do
    for j from 1 to D do
        Pi,j=rnd.(upj-lowj)+lowj// Inicialização da população, P
        old Pi,j=rnd.(upj-lowj)+lowj// Inicialização para oldP
    end
    fitnessPi=ObjFun(Pi)// valores iniciais de oportunidade para P
end
for iteration from 1 to maxcycle do
    //SELEÇÃO I
    if (a<b|a,b~U(0,1)) then oldP:=P end
    oldP:=permuting(oldP)// 'permutando' mudanças arbitrárias em posições de dois
    indivíduos em OldP
    Geração de população de ensaio
    // MUTAÇÃO
    mutant = P + 3.rndn (oldP – P)
    // CROSSOVER
    map1:N,1:D=1// mapa inicial é uma matriz N-por-D de uns
    if (c<d|c,d~U(0,1)) then
        for i from 1 to N do
            mapi,u (1:[mixrate.rnd.D])=0 | u= permuting ((1,2,3,...,D))
        end
    else
        for i from 1 to N do, mapi,randi(D)=0,end
    end
    // GERAÇÃO DE TENTATIVAS POPULAÇÃO, T
    T:=mutant
    for i from 1 to N do
        for j from 1 to D do
            if mapi,j=1 then Ti,j:Pi,j
        end
    end
    // Mecanismo de controle de limite
    for i from 1 to N do
        for j from 1 to D do
            if (Ti,j<lowj) or (Ti,j>upj) then
                Ti,j=rnd.(upj-lowj)+lowj
            end
        end
    end
    // SELEÇÃO II
    fitnessT=ObjFnc(T)
    for i from 1 to N do
        if fitnessTi < fitness Pi then
            fitnessPi :=fitnessTi
            Pi:Ti
        end
    end
    fitnessPbest=min(fitnessP) | best ∈ {1,2,3,...,N}
    if fitnessPbest < globalminimum then
        globalminimum:=fitnessPbest
        globalminimizer:=Pbest
    // Export globalminimum and globalminimizer
end
end

```

Figura 3.7 – Pseudocódigo de BSA – Fonte adaptada de Civicioglu (2013)

3.9 Deslocamento Entre Andares (*Drift*) - Norma NBR15421

A Norma Brasileira NBR15421, 2006, fixa os requisitos exigíveis para a verificação da segurança das estruturas sujeitas às ações dinâmicas provenientes de sismos. Uma das verificações realizadas pela Norma é a referente ao deslocamento entre andares (*Drift*). A Norma especifica requisitos de verificação da segurança aplicáveis às estruturas e peças estruturais construídas com quaisquer materiais usualmente empregados na construção civil.

Conforme especificado na NBR15421, 2006, o sistema estrutural sismo-resistente deve ser sempre contínuo. Caso as estruturas sejam divididas em partes, separadas por juntas de construção, estas devem apresentar entre si distâncias que permitam que não haja contato entre elas para os deslocamentos absolutos δ_x nas elevações.

Esta norma especifica os requisitos de projeto de estruturas civis, visando à preservação de vidas humanas, a redução nos danos esperados em edificações e a manutenção da operacionalidade de edificações críticas, durante e após um evento sísmico.

Deve ser verificado se os deslocamentos absolutos avaliados na estrutura principal podem implicar danos ou risco de perda de estabilidade para os elementos estruturais ou não estruturais a eles eventualmente fixados.

Os deslocamentos relativos Δx de um pavimento i , são limitados aos valores máximos definidos na Tabela 3.1. A variável h_{sx} é a distância entre as duas elevações correspondentes ao pavimento em questão.

Tabela 3.1- Limitação para deslocamentos relativos de pavimentos (Δx)

Categoria de utilização		
I	II	III
0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}	0,010 h_{sx}

Fonte NBR 15421

Na Tabela 3.2 é apresentada a definição das categorias de utilização e dos fatores de importância de utilização (I) das edificações.

Tabela 3.2 - Definição das categorias de utilização e dos fatores de importância de utilização
(I)

Categoria de utilização	Natureza da Ocupação	Fator I
I	Todas as estruturas não classificadas como de categoria II ou III	1,00
II	<p>Estruturas de importância substancial para a preservação da vida humana no caso de ruptura, incluindo, mas não estando limitadas às seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Estruturas em que haja reunião de mais de 300 pessoas em uma única área * Estruturas para educação pré-escolar com capacidade superior a 150 ocupantes * Estruturas para escolas primárias ou secundárias com mais de 250 ocupantes * Estruturas para escolas superiores ou para educação de adultos com mais de 500 ocupantes * Instituições de saúde para mais de 50 pacientes, mas sem instalações de tratamento de emergência ou para cirurgias * Instituições penitenciárias * Quaisquer outras estruturas com mais de 5 000 ocupantes * Instalações de geração de energia, de tratamento de água potável, de tratamento de esgotos e outras instalações de utilidade pública não classificadas como de categoria III * Instalações contendo substâncias químicas ou tóxicas cujo extravasamento possa ser perigoso para a população, não classificadas como de categoria III 	1,25
III	<p>Estruturas definidas como essenciais, incluindo, mas não estando limitadas, às seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Instituições de saúde com instalações de tratamento de emergência ou para cirurgias * Prédios de bombeiros, de instituições de salvamento e policiais e garagens para veículos de emergência * Centros de coordenação, comunicação e operação de emergência e outras instalações necessárias para a resposta em emergência * Instalações de geração de energia e outras instalações necessárias para a manutenção em funcionamento das estruturas classificadas como de categoria III * Torres de controle de aeroportos, centros de controle de tráfego aéreo e hangares de aviões de emergência * Estações de tratamento de água necessárias para a manutenção de fornecimento de água para o combate ao fogo * Estruturas com funções críticas para a Defesa Nacional * Instalações contendo substâncias químicas ou tóxicas consideradas altamente perigosas, conforme classificação de autoridade governamental designada para tal 	1,5

Fonte NBR 15421

4 VERIFICAÇÃO DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS

Com o intuito de garantir a integridade dos programas desenvolvidos, encontram-se na literatura vários casos padrões, os chamados *benchmarks*, os quais servem como referência para comparação da metodologia desenvolvida e aplicada, com as metodologias consolidadas.

Neste trabalho serão utilizados dois artigos para a verificação dos programas computacionais elaborados, os quais englobam: a verificação da geração do sinal sísmico, a verificação da resposta da estrutura com um único AMS instalado, e a verificação da resposta da estrutura quando há múltiplos AMS instalados.

4.1 Verificação do Programa de Geração do Sismo Artificial

Visando a verificação do programa de geração do sinal sísmico, comparou-se os resultados do programa elaborado com os obtidos no trabalho de Mohebbi et al., 2012. Como explicado anteriormente, o sinal sísmico aleatório foi gerado através do espectro de Kanai-Tajimi, 1961. Os mesmos parâmetros adotados por Mohebbi et al., 2012, foram utilizados, que são: frequência natural do solo (ω_g) de 37,3rad/s, razão de amortecimento do solo (ζg) de 0,3, *peak ground acceleration* (PGA) de 0,475g, tempo inicial de 0 segundos, tempo final de 50 segundos, e um incremento dt de 0,02 segundos. Foi adotado um vetor de frequências variando de 0 à 25Hz, com incremento de 0,01Hz.

Na Figura 4.1, é apresentado o gráfico do sinal sísmico gerado pelo programa do presente estudo. Pode-se verificar que os picos de aceleração estão dispostos dentro da faixa estipulada por Mohebbi et al., 2012, com valor de $PGA = 0,475g$, onde $g=9,80665m/s^2$.

A Figura 4.2 apresenta o sinal gerado por Mohebbi et al., 2012. Como se pode observar, os resultados são muito semelhantes.

Observação: A comparação numérica entre os dados obtidos por Mohebbi e o presente estudo não é possível, devido a bibliografia disponível na literatura ser somente o exposto na Figura 4.2, e não os dados numéricos.

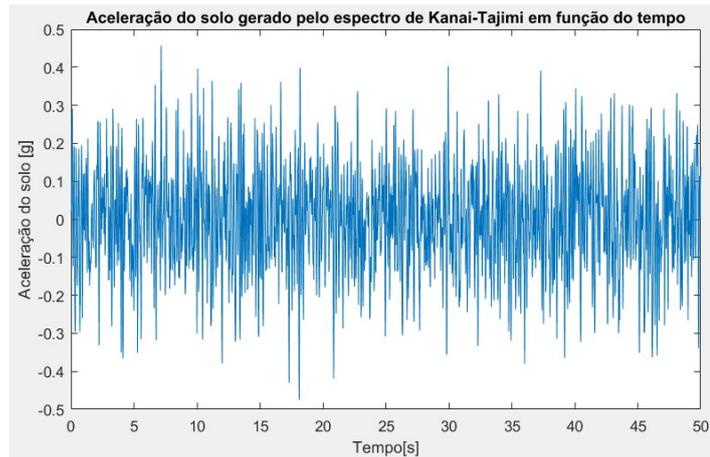


Figura 4.1 - Aceleração do solo em função do tempo

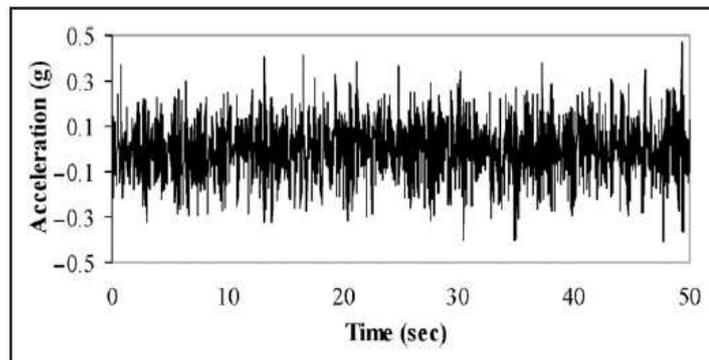


Figura 4.2 - Aceleração do solo em função do tempo [Mohebbi et al., 2012]

Na Figura 4.3 é apresentado o gráfico do espectro do sinal de aceleração do solo gerado na Figura 4.1. Verifica-se que o pico no espectro ocorre próximo ao valor da frequência do solo, que é de $37,3 \text{ rad/s} = 5,94 \text{ Hz}$, comprovando a eficácia do procedimento de geração do sinal sísmico.

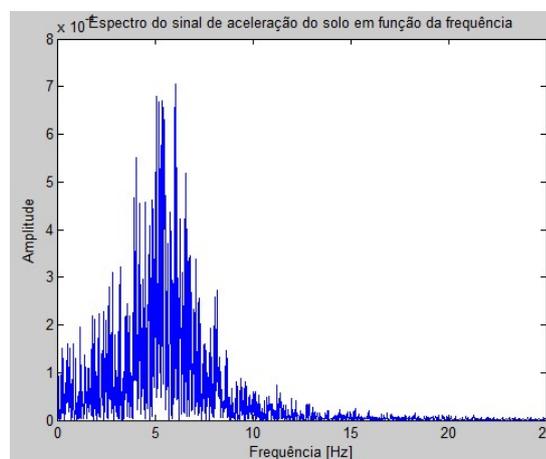


Figura 4.3 - Espectro do sinal de aceleração

Após esta verificação, pode-se simular um sinal sísmico para qualquer local onde se queira implantar uma estrutura. Sendo necessário somente conhecer as características do solo, bem como, a frequência a qual se quer sintonizar a estrutura, geralmente sendo a do primeiro modo de vibração da estrutura.

4.2 Verificação da Análise Dinâmica Sem AMS, Opção 1 – Por Mohebbi (1 Único AMS)

Da mesma forma que para o sinal sísmico, efetuou-se a verificação do programa para a determinação da resposta dinâmica da estrutura não controlada. O modelo adotado para verificação sem AMS foi o proposto por Mohebbi et al., 2012, onde os valores de massa, rigidez e amortecimento para cada um dos 10 pavimentos do edifício são $m=360\text{ton}$, $k=650\text{MN/m}$, e $c=6,2\text{MN/s/m}$, respectivamente. A excitação sísmica adotada para a verificação foi a gerada através de 4 simulações com o espectro de Kanai e Tajimi. Na Tabela 4.1 é apresentado um comparativo dos resultados obtidos pelo programa desenvolvido com os obtidos por Mohebbi et al., 2012.

Tabela 4.1 - Comparativo deslocamentos e acelerações sem AMS.

Andar	Mohebbi et. Al, 2012		Simulação 1		Simulação 2		Simulação 3		Simulação 4	
	Desloc.	Acel.	Desloc.	Acel.	Desloc.	Acel.	Desloc.	Acel.	Desloc.	Acel.
1	2,17	345,35	2,20	382,56	2,28	409,94	2,05	349,29	2,20	392,64
2	4,30	571,60	4,30	565,00	4,49	639,28	4,02	510,85	4,30	588,45
3	6,28	708,65	6,21	670,88	6,58	761,26	5,85	630,89	6,24	719,86
4	8,01	708,89	7,92	721,56	8,50	792,52	7,55	687,22	8,10	757,31
5	9,50	749,88	9,41	721,14	10,24	766,19	9,09	684,06	9,81	763,38
6	10,75	719,11	10,68	710,35	11,76	729,66	10,45	700,72	11,26	768,70
7	11,86	713,77	11,74	714,99	13,04	808,15	11,61	728,43	12,45	809,82
8	12,88	713,73	12,56	743,61	14,02	883,02	12,53	729,35	13,35	850,73
9	13,63	730,84	13,15	783,96	14,70	944,14	13,17	751,91	13,96	873,05
10	14,03	802,68	13,44	812,80	15,06	979,06	13,50	795,27	14,26	904,22

onde Desloc. é o deslocamento máximo por andar em cm, e Acel. é a aceleração máxima por andar em cm/s^2 .

Pode-se observar que as respostas são próximas às da literatura de referência, não sendo idênticas, devido à aleatoriedade do sinal sísmico gerado.

Na Figura 4.4 são apresentados os gráficos de resposta em termos do deslocamento no topo da estrutura para as 4 simulações realizadas.

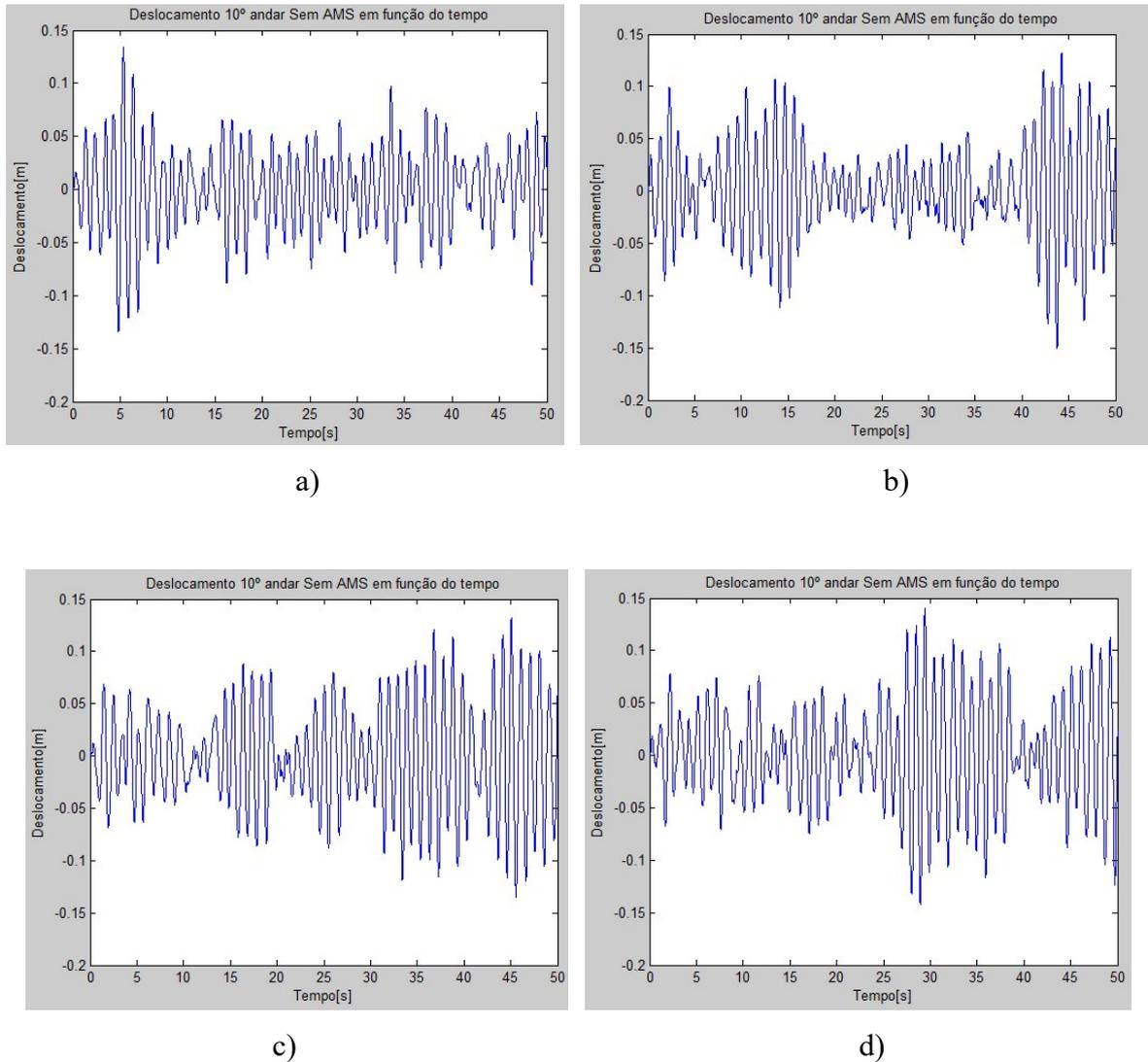


Figura 4.4 - Deslocamentos no último andar do edifício.
a) Simulação 1; b) simulação 2; c) simulação 3; e d) simulação 4.

4.3 Verificação da Análise Dinâmica Com Um AMS

Para verificação do programa com um único AMS, foi adotado o modelo do exemplo 1 proposto por Miguel et al., 2013, o qual faz referência a três autores distintos: Bekdas e Nigdeli, 2011, Hadi e Arfiadi, 1998, Lee et al., 2006.

Para o evento sísmico é utilizado o sinal de excitação referente ao registro de aceleração do solo ocorrido em 1940, sob o *Imperial Valley*, no sudeste da Califórnia, denominado *El Centro*. Este terremoto ocorreu às 21:35 horário padrão do Pacífico em 18 de maio, no *Imperial Valley*, próximo à fronteira entre Estados Unidos e México, e teve a duração de

aproximadamente 54 segundos. A magnitude deste sismo foi de 6,9 e uma intensidade máxima percebida de X (Extrema) na escala de intensidade de Mercalli. Sendo o primeiro e mais forte terremoto gravado no *Imperial Valley* por um grande sismógrafo localizado próximo a uma ruptura da falha [Hough, 2004]. Sendo caracterizado como um evento destrutivo de tamanho moderado típico, causando danos generalizados aos sistemas de irrigação, a morte de 9 pessoas, e 80% dos edifícios foram danificados em algum grau. Na área de negócios da *Brawley*, 50% das estruturas foram condenadas e todas foram atingidas. Foi o primeiro teste de resistência às escolas públicas após o terremoto *Long Beach* ocorrido em 1933. O sinal sísmico *El Centro* pode ser obtido em “<http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>”.

Na Figura 4.5, é apresentado o gráfico do sinal sísmico *El Centro* em função do tempo.

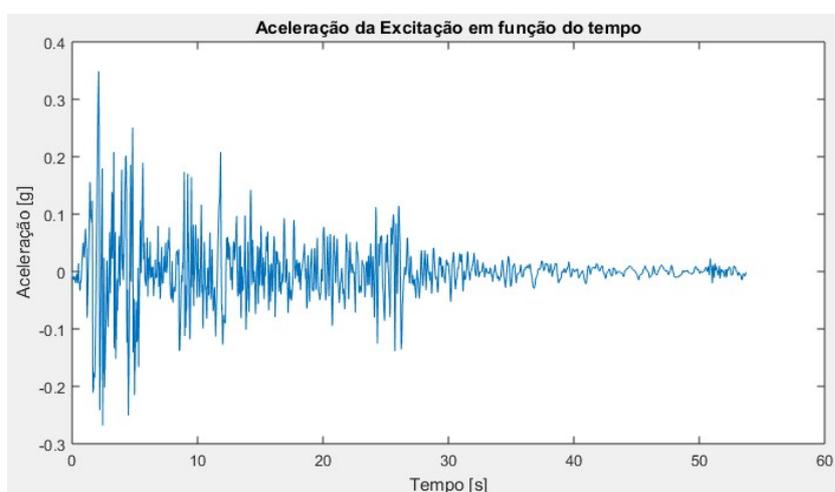


Figura 4.5 - Aceleração do solo em função do tempo. Sismo El Centro.

Os valores dos parâmetros do AMS utilizados para cada um dos autores são expostos na Tabela 4.2. Os comparativos entre os autores e o presente estudo, são expostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 - Valores do AMS.

Autores	Massa (kg)	Rigidez (N/m)	Amortecimento (Ns/m)
Bekdas e Nigdeli (2011)	65000	2570000	115000
Hadi e Arfiadi (1998)	108000	3750000	151500
Lee et. al (2006)	108000	4126930	271790

Tabela 4.3 - Comparativo deslocamentos [m] com AMS.

Andar	Bekdas e Nigdeli (2011)			Hadi e Arfiadi (1998)			Lee et. al (2006)		
	Bekdas e Nigdeli (2011)	Miguel et. al (2013)	Presente estudo	Hadi e Arfiadi (1998)	Miguel et. al (2013)	Presente estudo	Lee et. al (2006)	Miguel et. al (2013)	Presente estudo
1	0,016	0,022	0,023	0,019	0,019	0,019	0,020	0,020	0,020
2	0,031	0,043	0,044	0,037	0,036	0,037	0,039	0,039	0,040
3	0,044	0,063	0,064	0,058	0,053	0,054	0,057	0,057	0,058
4	0,057	0,081	0,083	0,068	0,068	0,069	0,073	0,072	0,074
5	0,068	0,096	0,098	0,082	0,081	0,083	0,087	0,086	0,088
6	0,078	0,109	0,112	0,094	0,093	0,095	0,099	0,098	0,100
7	0,087	0,120	0,123	0,104	0,104	0,106	0,108	0,108	0,110
8	0,094	0,129	0,131	0,113	0,112	0,115	0,117	0,116	0,119
9	0,099	0,134	0,137	0,119	0,119	0,121	0,123	0,123	0,125
10	0,102	0,137	0,140	0,122	0,122	0,124	0,126	0,126	0,128
AMS	0,395	0,436	0,445	0,358	0,355	0,362	0,282	0,300	0,312

Salienta-se que, como explicado no trabalho de Miguel et al., 2013, os resultados de Bekdas e Nigdeli, 2011, estão errados, por isso a diferença com os valores obtidos neste trabalho e com os dos demais autores.

Na Figura 4.6, são apresentados os deslocamentos do último andar antes e após a implantação do AMS, referente aos resultados com os parâmetros dos três autores constantes na Tabela 4.3.

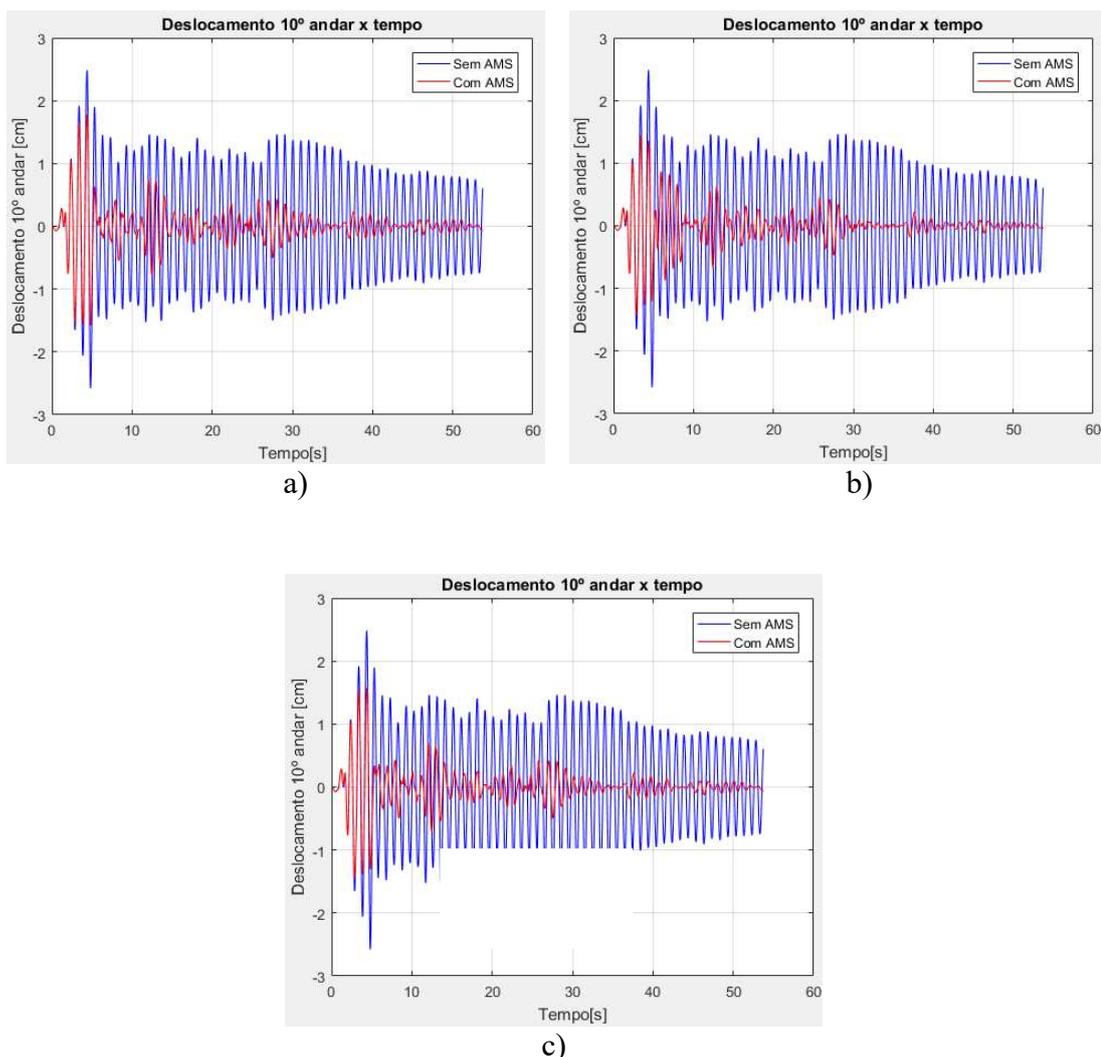


Figura 4.6 - Deslocamentos do 10º andar. a) AMS com parâmetros de Bekdas e Nigdeli; b) AMS com parâmetros de Hadi e Arfiadi; c) AMS com parâmetros de Lee et al.

4.4 Verificação da Análise Dinâmica Sem AMS, Opção 2 – Por Miguel (Múltiplos AMS)

Conforme feito para a verificação do programa para cálculo da resposta dinâmica com um único AMS, foi também verificado o programa para cálculo da resposta dinâmica com múltiplos AMS. Inicialmente a verificação do programa é feita para o caso sem AMS, considerando a excitação do sismo *El Centro* e através do exemplo *Uncontrolled* proposto por Miguel et al., 2016. Foi considerado o mesmo edifício de 10 pavimentos com as seguintes propriedades: $m=360\text{ton}$, $k=650\text{MN/m}$, e $c=6,2\text{MN/s/m}$, porém agora submetido ao sismo de *El Centro*. Na Tabela 4.4 são expostos os resultados obtidos com o programa desenvolvido nesta dissertação, comparando com os resultados de Miguel et al., 2016, para a estrutura não controlada.

Tabela 4.4 - Comparativo deslocamentos [m] sem AMS.

Estrutura não Controlada		
Andar	Miguel et. al. (2016)	Presente estudo
1	0,0304	0,0304
2	0,0595	0,0595
3	0,0865	0,0865
4	0,1111	0,1111
5	0,1327	0,1327
6	0,1509	0,1509
7	0,1656	0,1656
8	0,1766	0,1766
9	0,184	0,184
10	0,1877	0,1877

Na Figura 4.7 - são apresentados os deslocamentos do último andar da estrutura não controlada em função do tempo.

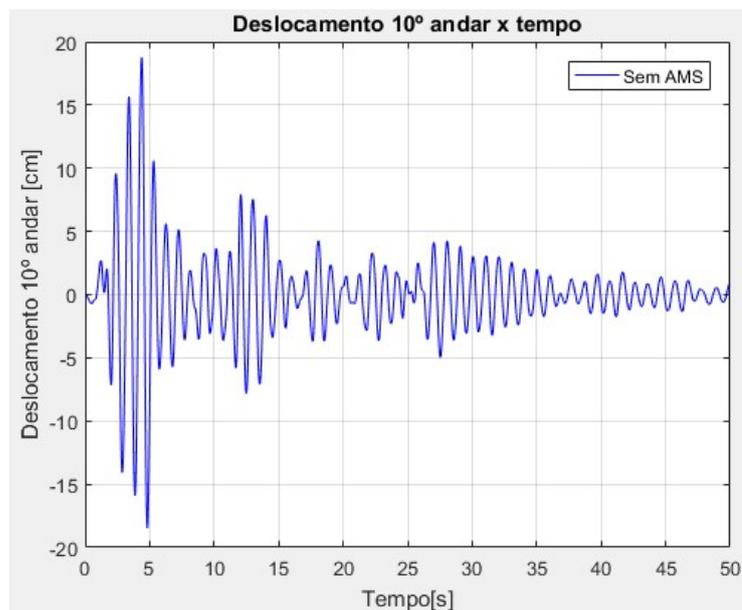


Figura 4.7 - Deslocamentos do último andar da estrutura não controlada

4.5 Verificação da Análise Dinâmica Com 10 AMS

Nesta seção é feita a verificação do programa com múltiplos AMS através de dois exemplos da literatura.

As verificações foram feitas com a excitação do sismo *El Centro* e através dos exemplos *Scenario 1* e *Scenario 2* propostos por Miguel et al., 2016. O edifício adotado para verificação foi o mesmo utilizado nos casos anteriores, de 10 pavimentos, proposto por Mohebbi et al., 2012, em que os valores de massa, rigidez e amortecimento por pavimento são $m=360\text{ton}$, $k=650\text{MN/m}$, e $c=6,2\text{MNs/m}$, respectivamente. Para o *Scenario 1* são adotados para cada AMS os parâmetros massa de 10,8t, rigidez de 386,5kN/m e amortecimento 18,1kNs/m. Para o *Scenario 2* são utilizados os algoritmos de otimização adotados neste trabalho, sendo eles o BSA e o FA, com os limites de variação das variáveis de projeto (*upper e lower bounds*) dados no artigo de referência, para fins de comparação e verificação.

No caso do *Scenario 1* fixaram-se os valores dos parâmetros dos MAMS como sendo exatamente iguais aos adotados por Miguel et al., 2016. Com isso, é possível observar na Tabela 4.5 que os resultados obtidos com o programa desenvolvido nesta dissertação são iguais aos obtidos no artigo de referência, verificando a eficácia da rotina desenvolvida para cálculo da resposta dinâmica com MAMS. A Figura 4.8 apresenta os deslocamentos no 10º andar do edifício para o *Scenario 1*.

Tabela 4.5 - Comparativo deslocamentos [m] com 10 AMS *Scenario 1*.

Scenario 1		
Andar	Miguel et. al. (2016)	Presente estudo
1	0.0187	0.0187
2	0.0366	0.0366
3	0.0532	0.0532
4	0.0682	0.0682
5	0.0816	0.0816
6	0.0938	0.0938
7	0.1043	0.1043
8	0.1129	0.1129
9	0.1191	0.1191
10	0.1223	0.1223

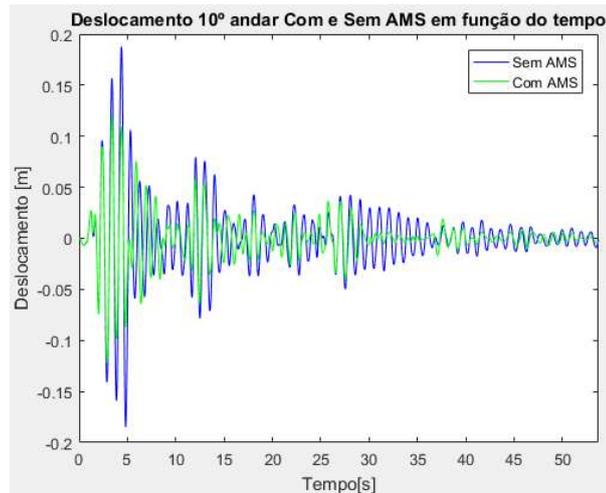


Figura 4.8 - Deslocamentos do último andar da estrutura para o *Scenario 1*.

No caso do *Scenario 2*, a fim de avaliar também os algoritmos de otimização, os valores dos parâmetros dos MAMS foram tomados como variáveis de projeto, considerando os limites dados no artigo de referência, que são: para cada AMS é adotada uma massa fixa de 10,8t, rigidez variando com de -0,8MN/m a 4MN/m, e amortecimento variando de 3kNs/m a 18kNs/m. E a função objetivo é minimizar o deslocamento máximo no topo do edifício. Na Tabela 4.6, são apresentados os parâmetros de rigidez e amortecimento, bem como, as respostas em termos de deslocamentos, encontrados por Miguel (2016) para o *Scenario 2*.

Tabela 4.6 - Parâmetros de rigidez, amortecimento e respostas em termos de deslocamentos, encontrados por Miguel 2016 *scenario 2*

Scenario 2			
Andar	Rigidez [N/m]	Amortecimento [Ns/m]	Deslocamento [m]
1	4,49382E+05	1,30800E+04	0,0186
2	3,53481E+05	1,51810E+04	0,0364
3	3,53517E+05	1,51780E+04	0,0528
4	3,53487E+05	1,51820E+04	0,0678
5	5,12496E+05	9,66800E+03	0,081
6	3,53462E+05	1,51780E+04	0,0932
7	4,49587E+05	1,30710E+04	0,1036
8	3,53463E+05	1,51810E+04	0,1123
9	3,53505E+05	1,51810E+04	0,1184
10	3,53576E+05	1,51800E+04	0,1215

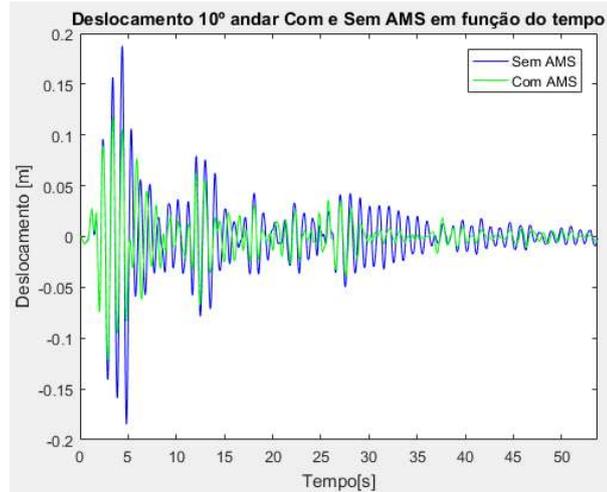
Na Tabela 4.7 são expostos além dos resultados de deslocamentos obtidos com o programa desenvolvido, comparando com os resultados de Miguel et al., 2016, para o *Scenario*

2, os valores das rigidezes e amortecimentos obtidos com os dois algoritmos. É possível observar nesta tabela que os resultados dos deslocamentos obtidos nesta dissertação, tanto com o algoritmo BSA quanto com o FA, são muito próximos aos obtidos no artigo de referência, verificando a eficácia do método proposto.

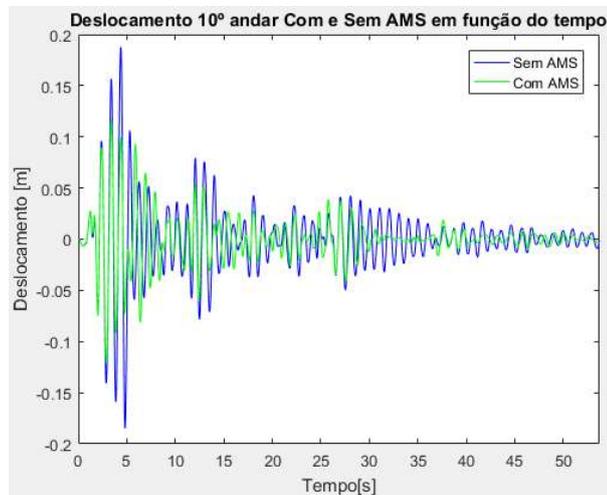
Tabela 4.7 - Comparativo deslocamentos, rigidezes e amortecimentos com 10 AMS *Scenario 2*

Scenario 2									
Andar	Rigidez [N/m]			Amortecimento [Ns/m]			Deslocamento [m]		
	Miguel et. al. (2016)	Presente estudo com BSA	Presente estudo com FA	Miguel et. al. (2016)	Presente estudo com BSA	Presente estudo com FA	Miguel et. al. (2016)	Presente estudo com BSA	Presente estudo com FA
1	4,49382E+05	3,85499E+05	3,88089E+05	1,30800E+04	1,30100E+04	1,62700E+04	0,0186	0,0186	0,0198
2	3,53481E+05	4,14195E+05	1,52051E+06	1,51810E+04	1,50490E+04	8,10400E+03	0,0364	0,0363	0,0384
3	3,53517E+05	4,19957E+05	3,85070E+05	1,51780E+04	1,50110E+04	1,26310E+04	0,0528	0,0527	0,0555
4	3,53487E+05	4,11411E+05	3,78478E+05	1,51820E+04	1,50130E+04	4,84200E+03	0,0678	0,0676	0,0709
5	5,12496E+05	3,93589E+05	1,41187E+06	9,66800E+03	9,50000E+03	1,00770E+04	0,081	0,0808	0,0852
6	3,53462E+05	4,27039E+05	3,82567E+05	1,51780E+04	1,50000E+04	8,68900E+03	0,0932	0,093	0,0978
7	4,49587E+05	4,04702E+05	3,85104E+05	1,30710E+04	1,30000E+04	1,18790E+04	0,1036	0,1033	0,1083
8	3,53463E+05	3,95580E+05	3,12133E+06	1,51810E+04	1,50000E+04	1,25540E+04	0,1123	0,112	0,1165
9	3,53505E+05	4,07206E+05	3,82327E+05	1,51810E+04	1,50060E+04	9,62300E+03	0,1184	0,118	0,1221
10	3,53576E+05	4,06033E+05	3,77222E+05	1,51800E+04	1,50000E+04	3,72900E+03	0,1215	0,1212	0,1253

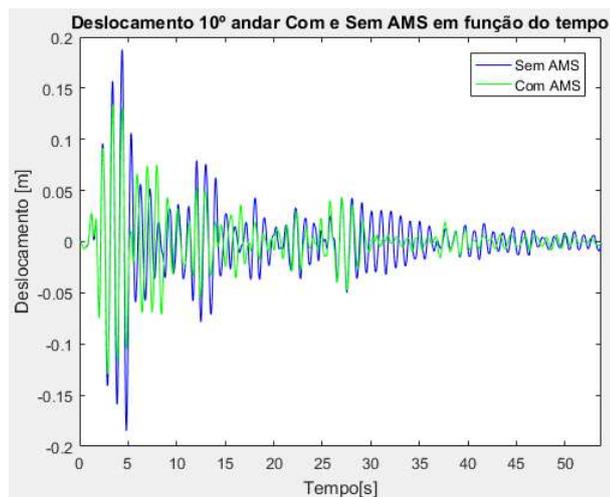
A Figura 4.9 apresenta os deslocamentos no 10º andar do edifício para o *Scenario 2*.



a)



b)



c)

Figura 4.9 - Deslocamentos do último andar do edifício. a) AMS Miguel et al.; b) AMS Presente estudo com BSA; c) AMS Presente estudo com FA.

5 EXEMPLO ILUSTRATIVO: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a verificação dos programas desenvolvidos realizada no capítulo anterior, neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta para otimização de parâmetros de AMS ou MAMS instalados em edifícios submetidos à ação sísmica com o objetivo de minimizar a resposta dinâmica da estrutura.

5.1 Estrutura em Estudo

O modelo de edifício adotado para determinação das respostas da estrutura submetida ao evento sísmico é um edifício metálico de 10 andares, o qual está representado na Figura 5.1.

Os valores de massa e rigidez adotados por andar estão expostos na Tabela 5.1. O amortecimento próprio da estrutura é considerado proporcional à massa e à rigidez, com uma razão de amortecimento de 0,5% para o primeiro e segundo modos.

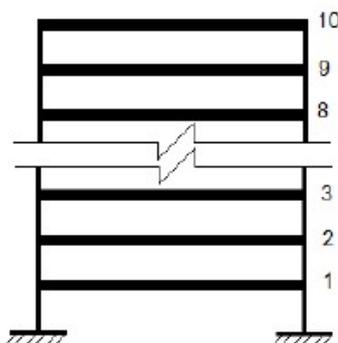


Figura 5.1 - Estrutura com 10 GDL

Tabela 5.1 - Propriedades do edifício em estudo

Andar	Massa [kg]	Rigidez[N/m]
1	105000	990000000
2	105000	990000000
3	105000	792000000
4	105000	792000000
5	105000	792000000
6	105000	792000000
7	105000	404400000
8	105000	288600000
9	105000	185400000
10	105000	185400000

Calculam-se as dez frequências naturais da estrutura sem o AMS, as quais resultam, em Hz: 1,93; 4,44; 7,61; 10,28; 12,04; 14,64; 17,54; 21,9; 25,6; 27,75.

5.2 Geração do Sinal Sísmico

Como explicado anteriormente, para a geração dos sinais sísmicos, foi adotado o espectro de Kanai-Tajimi. Usou-se como parâmetros de entrada para a geração do sinal sísmico, o tempo inicial $t = 0$ segundos, tempo final = 50 segundos, e um incremento $dt = 0,02$ segundos. Foi adotado um vetor de frequências, com frequência máxima de 25Hz, incremento de 0,01Hz e frequência mínima de zero Hz.

Foi assumido que a estrutura será construída em um local onde o solo tem as seguintes características: razão de amortecimento (ζ_g) de 0,3 e frequência (ω_g) de 12rad/s, a qual é próxima à frequência fundamental da estrutura. Considerou-se também que o PGA desta região é de 0,475g.

Em função da aleatoriedade do sinal gerado devido ao ângulo de fase constante na equação 3.15, o qual varia de 0 a 2π , efetuaram-se 10 simulações de sismos com as mesmas características indicadas acima.

Na Figura 5.2 é apresentado o gráfico de densidade espectral da equação 3.15 com os parâmetros indicados acima, enquanto a Figura 5.3 mostra o sinal de aceleração do solo gerado em uma das 10 simulações e seu respectivo espectro.

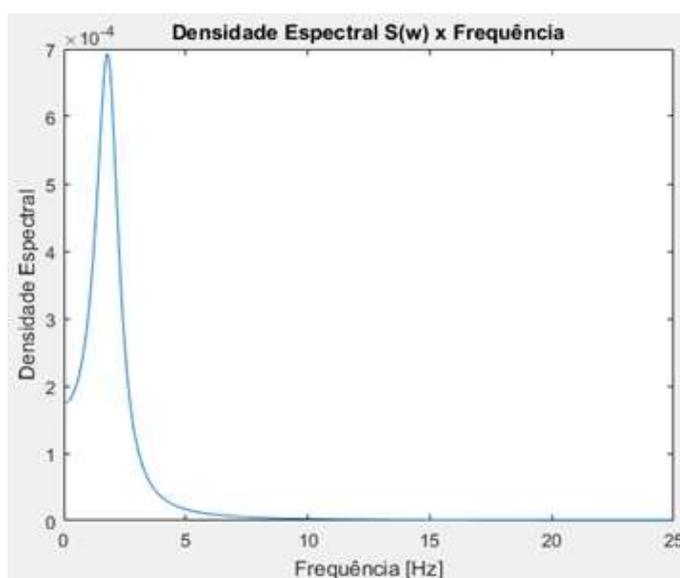
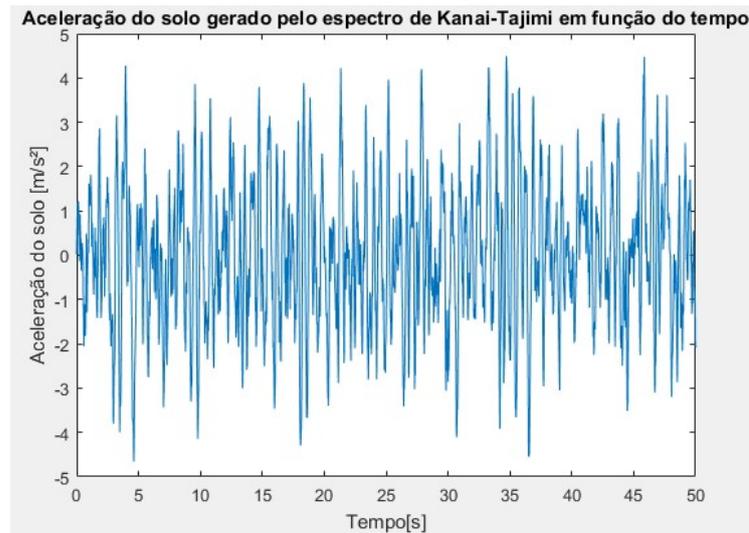
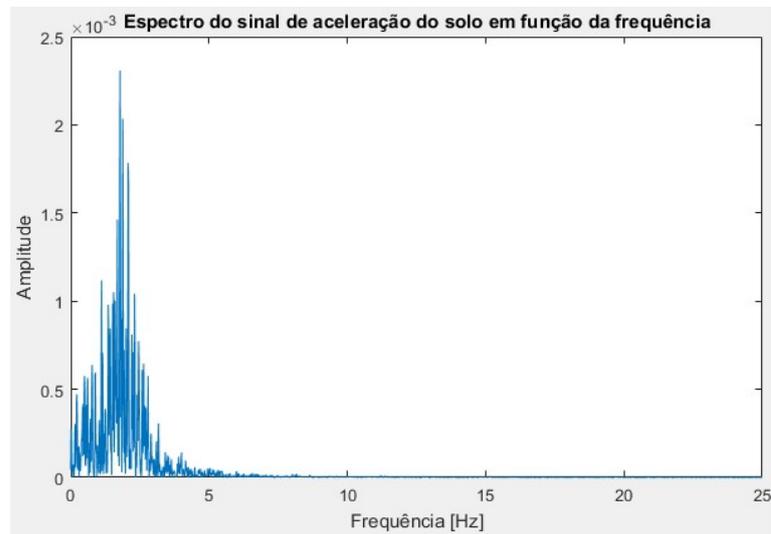


Figura 5.2 - Densidade espectral de Kanai-Tajimi (Eq. 3.15)



a)



b)

Figura 5.3 - a) Aceleração do solo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi em função do tempo; b) Espectro do sinal de aceleração do solo gerado.

A fim de ilustrar que apesar da aleatoriedade do sinal sísmico gerado a resposta dinâmica máxima da estrutura não varia consideravelmente, as Tabelas 5.2 e 5.3 mostram os deslocamentos e acelerações máximos, respectivamente, obtidos em cada andar da estrutura quando submetida a cada um dos 10 sinais sísmicos gerados.

Tabela 5.2 - Deslocamentos máximos dos andares da estrutura submetida aos sinais sísmicos

Andar / Simulação	Deslocamentos [cm]											Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1º	3,73	3,15	3,06	3,85	3,55	3,71	2,95	3,96	3,57	3,59	3,51	0,28	
2º	7,38	6,24	6,05	7,61	7,02	7,35	5,84	7,85	7,08	7,10	6,95	0,54	
3º	11,77	9,99	9,67	12,14	11,17	11,74	9,35	12,56	11,31	11,34	11,10	0,86	
4º	15,87	13,53	13,08	16,39	15,05	15,87	12,66	17,02	15,31	15,36	15,01	1,15	
5º	19,63	16,79	16,24	20,27	18,57	19,65	15,73	21,12	19,01	19,07	18,61	1,42	
6º	22,97	19,68	19,08	23,74	21,68	23,10	18,49	24,79	22,31	22,39	21,82	1,67	
7º	28,58	24,47	23,92	29,61	26,85	29,02	23,17	31,02	27,99	28,02	27,26	2,13	
8º	35,13	29,77	29,48	36,23	32,68	35,75	28,50	38,17	34,73	34,35	33,48	2,70	
9º	42,41	35,49	35,74	43,56	39,79	43,11	34,54	46,19	42,41	41,50	40,47	3,27	
10º	46,19	38,51	39,03	47,36	43,52	46,88	37,78	50,32	46,44	45,44	44,15	3,55	

Tabela 5.3 - Acelerações máximas dos andares da estrutura submetida aos sinais sísmicos

Andar / Simulação	Acelerações [cm/s ²]											Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1º	663,59	630,46	536,71	652,26	596,53	751,84	551,45	643,94	604,32	622,20	625,33	43,09	
2º	1238,90	1248,48	992,91	1247,13	1164,85	1421,64	968,23	1219,73	1172,86	1128,63	1180,34	94,84	
3º	1875,03	1944,56	1458,05	2021,29	1850,83	2240,92	1463,72	1912,05	1873,02	1854,56	1849,40	155,41	
4º	2429,54	2474,26	1933,56	2555,17	2455,77	2954,27	1953,06	2590,75	2425,89	2372,38	2414,46	196,88	
5º	2988,25	2909,58	2320,11	3045,54	2891,50	3473,00	2377,97	3157,54	2957,11	2872,71	2899,33	227,01	
6º	3607,12	3214,40	2670,32	3573,39	3362,80	3976,96	2792,02	3683,45	3422,64	3301,52	3360,46	292,72	
7º	4492,25	3732,79	3350,65	4443,47	3924,91	4760,44	3417,38	4620,38	4113,18	4154,13	4100,96	395,62	
8º	5594,19	4271,46	4126,84	5282,57	4673,80	5535,51	4038,89	5498,89	5249,89	5067,98	4934,00	525,00	
9º	6570,78	5457,37	5078,20	6306,14	5935,19	7163,86	5017,19	6881,91	6417,38	6287,38	6111,54	591,64	
10º	7096,47	6399,80	5645,07	7270,65	6624,83	8100,14	5759,34	7294,44	7100,82	7012,81	6830,44	578,54	

Devido a não ocorrência de variação considerável tanto nos deslocamentos quanto nas acelerações da estrutura, será adotado para a determinação e otimização dos parâmetros do AMS, o sismo referente à primeira simulação, o qual foi apresentado na Figura 5.3. A Figura 5.4 apresenta o gráfico de resposta em termos de deslocamentos do último andar da estrutura referente à simulação 1.

Vale salientar que os valores de aceleração estão altos em função ao modelo de edifício adotado. Por não ser um modelo físico os valores de massas e rigidezes por andar influenciam para que a aceleração dos andares seja alta.

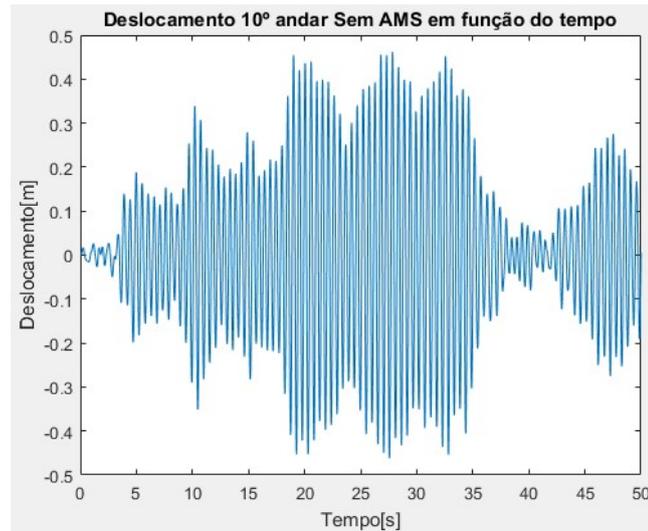


Figura 5.4 - Deslocamentos do último andar do edifício

5.3 Análise Dinâmica Sem AMS

Depois de calculadas as frequências naturais da estrutura e a definição do sinal sísmico a adotar, a estrutura é submetida ao sinal sísmico, visando à obtenção da resposta quanto a deslocamentos e acelerações somente com seu amortecimento próprio, para fins comparativos e de referência.

As frequências naturais da estrutura sem o AMS, ou seja, somente com seu amortecimento próprio em Hz são: 1,93; 4,44; 7,61; 10,28; 12,04; 14,64; 17,54; 21,9; 25,6; 27,75.

Submetendo o edifício à excitação sísmica apresentada na Figura 5.3, obtêm-se as amplitudes máximas apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Deslocamentos e acelerações máximos por andar

Sem AMS		
Andar	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)
1º	3,73	663,59
2º	7,38	1238,90
3º	11,77	1875,03
4º	15,87	2429,54
5º	19,63	2988,25
6º	22,97	3607,12
7º	28,58	4492,25
8º	35,13	5594,19
9º	42,41	6570,78
10º	46,19	7096,47

Como se pode observar os deslocamentos e acelerações máximos ocorreram no último (décimo) andar do edifício. Conforme Rossato, 2016, os deslocamentos e acelerações serão maiores, quando o edifício estiver submetido à excitação com frequência próxima a do primeiro modo de vibração.

Na Figura 5.5 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações do último andar da estrutura sem AMS.

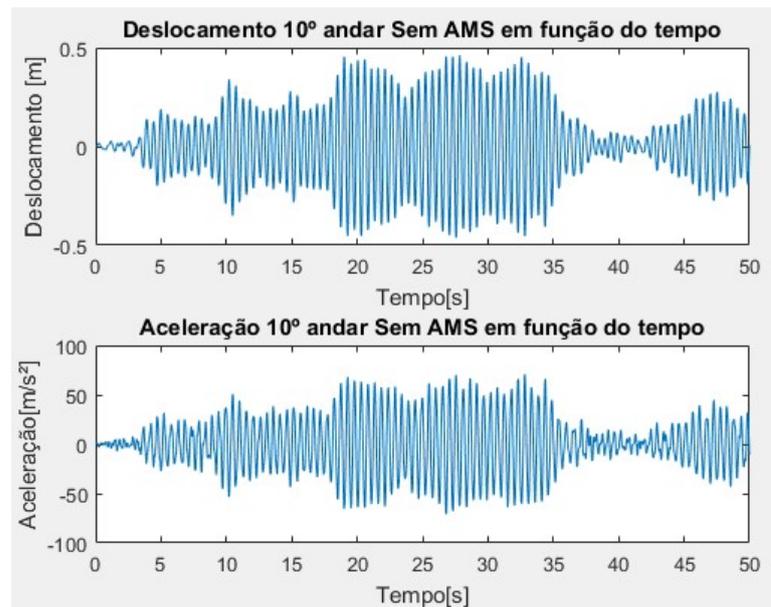


Figura 5.5 - Deslocamentos e acelerações do último andar

5.4 Análise Dinâmica Com AMS

Para a determinação dos parâmetros de um único AMS e múltiplos AMS, serão adotados os dois algoritmos descritos neste trabalho (BSA e o FA).

A função objetivo é minimizar o deslocamento máximo no topo do edifício, e as variáveis de projeto, são a relação de massas (AMS - Estrutura), rigidez e amortecimento do ou dos AMSs.

Primeiramente são determinados os parâmetros ótimos para um único AMS, e após são determinados os parâmetros ótimos para múltiplos AMS. A otimização é feita para ambos os casos (Um e Múltiplos) através dos dois algoritmos independentemente. Esta otimização com dois algoritmos distintos possibilitará um comparativo de tempo e melhor resposta da estrutura entre os algoritmos.

Ao final dos resultados será feito um comparativo entre todas as opções geradas e selecionada a melhor. O critério de seleção será a menor resposta em termos de deslocamentos e acelerações, juntamente com a menor relação de massa total adotada para o AMS (um ou múltiplos).

Depois de selecionado o melhor caso, o mesmo será verificado quanto aos deslocamentos relativos entre pavimentos (*Drift*) de acordo com a Norma NBR15421 Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento.

5.4.1 Análise Dinâmica Com Um Único AMS Pelo Método De Villaverde Uma Variável de Projeto

Para o dimensionamento de um único AMS pelo método de Villaverde, 1980, e Villaverde, 1985, utilizaram-se as equações apresentadas na seção 3.6. Para a determinação dos parâmetros do AMS, os valores de limite inferior e superior da relação de massa modal (estrutura-AMS) foram, respectivamente, 0 e 0,03. Neste caso a relação de massa modal é a única variável de projeto. Os parâmetros rigidez e amortecimento são determinados em função da relação de massas.

5.4.1.1 Algoritmos Firefly - FA e Backtracking Search Optimization – BSA

O tamanho populacional para os algoritmos *Firefly* (FA) e *Backtracking Search Optimization Algorithm* (BSA) adotado correspondeu a 10 indivíduos, com 50 iterações. Assim, perfazendo o número total de 500 avaliações. Não são adotadas restrições aos algoritmos. O melhor resultado para ambos os algoritmos foi encontrado quando a razão de massa modal (μ) é 0,03. Os valores adotados para os parâmetros AMS como massa, rigidez, amortecimento e razão de amortecimento são apresentados na Tabela 5.5. Como se pode observar nesta Tabela 5.5, a frequência resultante para o AMS foi de 1,93Hz, ou seja, coincidente com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Tabela 5.5 - Valores ótimos do AMS para μ de 0,03

Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
23198	145690	3397886	1,93

O número de avaliações foi baixo, devido aos limites para a relação de massa modal terem sido baixos também. Com isto, com pequenas avaliações os dois algoritmos já encontram o valor ótimo para a relação de massas, não necessitando aumentar o tempo computacional.

A massa do AMS não é diretamente relacionada com a massa total da estrutura, mas é determinada como estabelecido na seção 3.6, isto é, a massa do AMS é definida utilizando a razão de massa modal e não 3% da massa estrutural total. Obtém-se através da otimização o valor de 3% da massa modal, o que corresponde a 2,21% da massa total da estrutura, para o parâmetro massa do AMS, sendo a massa do AMS definida com o valor de 23198kg.

Após acoplar o AMS no último andar, incrementando a estrutura em um grau de liberdade, com as características apresentadas na Tabela 5.5, é refeita a análise dinâmica da estrutura para a verificação das amplitudes de vibração da mesma. Um comparativo entre as respostas da estrutura, sem e com AMS é apresentado a Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1º	3,73	663,59	1,58	317,19	57,75%	52,20%
2º	7,38	1238,90	3,12	597,49	57,76%	51,77%
3º	11,77	1875,03	4,97	917,50	57,75%	51,07%
4º	15,87	2429,54	6,71	1196,70	57,73%	50,74%
5º	19,63	2988,25	8,34	1383,79	57,55%	53,69%
6º	22,97	3607,12	9,83	1514,65	57,22%	58,01%
7º	28,58	4492,25	12,42	1762,22	56,54%	60,77%
8º	35,13	5594,19	15,48	2226,22	55,93%	60,20%
9º	42,41	6570,78	18,97	2771,04	55,26%	57,83%
10º	46,19	7096,47	21,01	2994,96	54,51%	57,80%

Como se pode observar na Tabela 5.6, a redução das amplitudes dos deslocamentos e acelerações ocorreu em todos os andares do edifício. Pode-se observar uma redução significativa nos deslocamentos e nas acelerações entre 50 e 60%.

Na Figura 5.6, são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações do último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelos algoritmos FA e BSA.

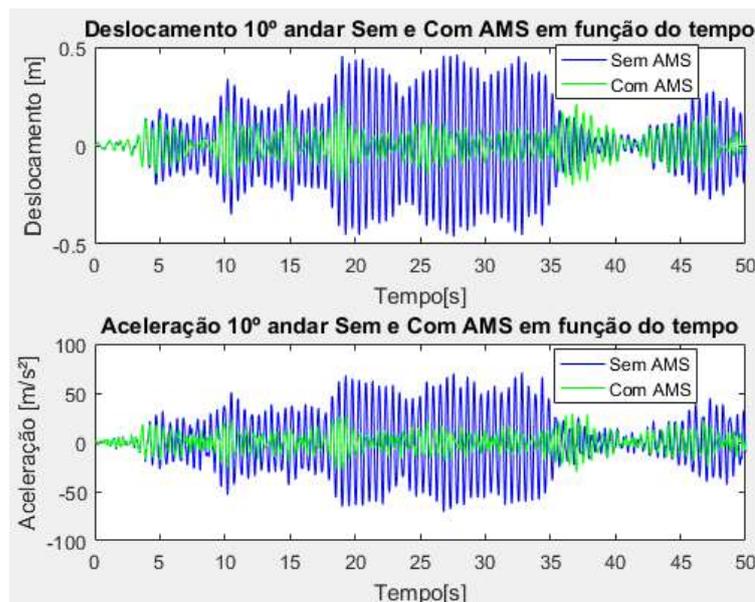


Figura 5.6 - Deslocamentos e acelerações do último andar

O método de Villaverde será adotado como parâmetro para a determinação posterior dos valores para rigidez e amortecimento. Nas bibliografias consultadas foram encontradas relações de massas a adotar, mas não relação de rigidez e amortecimento. Desta forma o método de Villaverde é de primordial importância para a adoção de valores limites de rigidez e amortecimento para os métodos seguintes.

Neste caso específico, não foi levado em consideração o tempo computacional, porém vale salientar de que o algoritmo BSA é ligeiramente mais rápido que o algoritmo FA.

5.4.2 Análise Dinâmica Com Um Único AMS Pelo Método De Villaverde Três Variáveis De Projeto

Assim como na seção 5.4.1, neste item são utilizadas as equações apresentadas na seção 3.6. No entanto, no item anterior foi adotada somente uma variável de projeto, sendo a relação de massas. Nesta nova determinação são adotadas três variáveis de projeto para a determinação dos parâmetros do AMS (massa, rigidez e amortecimento), sendo a relação de massas e valores mínimos e máximos de percentuais para rigidez e amortecimento, ainda com o método de Villaverde.

Para a determinação dos parâmetros do AMS os valores de limite inferior e superior foram, respectivamente:

- Relação de massas de 0 a 0,03
- Rigidez de 0,2 a 1,0 (20 a 100%)
- Amortecimento de 0,2 a 1,0 (20 a 100%)

Estes limites foram adotados pelo usuário para definir a relação de massa modal (estrutura-AMS). Os parâmetros rigidez e amortecimento continuam determinados com dependência da relação de massas.

Neste e nos demais casos os dois algoritmos serão considerados independentemente, ou seja, uma ou mais simulações para cada um dos algoritmos será mostrada separadamente, devido aos resultados obtidos para cada uma das variáveis ser diferente, mesmo que pequena diferença.

5.4.2.1 Algoritmo *Firefly* - FA

O tamanho populacional para o algoritmo *Firefly* (FA) adotado correspondeu a 10 indivíduos, com 50 iterações. Assim, perfazendo o número total de 500 avaliações. Não são adotadas restrições ao algoritmo. O melhor resultado encontrado se dá quando a razão de massa modal (μ) é 0,02015, rigidez 0,9609 e amortecimento 0,3342. Os valores adotados para os parâmetros AMS como massa, rigidez, amortecimento e razão de amortecimento são apresentados na Tabela 5.7. Como se pode observar nesta Tabela 5.7, a frequência resultante para o AMS foi de 1,89Hz, ou seja, muito próxima da frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Tabela 5.7 - Valores ótimos do AMS para μ de 0,02015, rigidez 0,9609 e amortecimento 0,3342

Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
15587	26927	2193932	1,89

Após acoplar o AMS no último andar, com as características apresentadas na Tabela 5.7, é refeita a análise dinâmica da estrutura para a verificação das amplitudes de vibração da mesma. Um comparativo entre as respostas da estrutura, sem e com AMS é apresentado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1º	3,73	663,59	1,47	353,71	60,57%	46,70%
2º	7,38	1238,90	2,88	644,62	60,94%	47,97%
3º	11,77	1875,03	4,53	955,23	61,47%	49,06%
4º	15,87	2429,54	6,08	1193,02	61,67%	50,90%
5º	19,63	2988,25	7,57	1451,92	61,44%	51,41%
6º	22,97	3607,12	8,94	1663,93	61,10%	53,87%
7º	28,58	4492,25	11,31	1949,75	60,43%	56,60%
8º	35,13	5594,19	14,04	2111,09	60,04%	62,26%
9º	42,41	6570,78	17,10	2628,02	59,68%	60,00%
10º	46,19	7096,47	18,83	3113,29	59,24%	56,13%

Através do algoritmo Firefly, na busca dos parâmetros ótimos para a determinação da resposta da estrutura, são realizadas mais duas simulações, os quais são alterados o número de avaliações para 1000 e 5000, visto que a massa não ficou com parâmetro relação de massa próximo ao limite superior adotado. Como se pode observar na Tabela 5.9, a redução quanto aos deslocamentos e acelerações em todos os andares é relevante (média de 4,35% para os deslocamentos e de 6,63% para acelerações com 1000 avaliações, e média de 5,53% para os deslocamentos e de 5,83% para acelerações com 5000 avaliações). Devido a estas reduções consideráveis, os parâmetros a adotar para o AMS são os referentes à opção de 5000 avaliações. Na Tabela 5.10 são apresentados os valores ótimos para os parâmetros AMS como massa, rigidez e amortecimento, cuja relação de massas modal (μ) é de 0,03, percentual de rigidez 0,9989 e percentual de amortecimento 0,399.

Tabela 5.9 - Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações

Andar	1000 avaliações		5000 avaliações	
	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
1º	4,99%	4,12%	6,34%	2,57%
2º	4,67%	5,44%	6,02%	4,28%
3º	4,22%	5,54%	5,56%	4,44%
4º	4,00%	6,59%	5,26%	5,60%
5º	4,07%	9,67%	5,29%	9,33%
6º	4,15%	8,83%	5,37%	9,54%
7º	4,27%	9,14%	5,42%	8,88%
8º	4,32%	3,53%	5,32%	2,73%
9º	4,29%	5,55%	5,22%	4,91%
10º	4,52%	7,94%	5,53%	6,05%

Tabela 5.10 - Valores ótimos do AMS para μ de 0,03, rigidez 0,9989 e amortecimento 0,399

Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
23198	58174	3394021	1,93

Como se pode observar nesta Tabela 5.10, a frequência resultante para o AMS foi de 1,93Hz, ou seja, coincidente com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Após acoplar o AMS no último andar, com as características apresentadas na Tabela 5.10, é refeita a análise dinâmica da estrutura para a verificação das amplitudes de vibração da mesma. Um comparativo entre as respostas da estrutura, sem e com AMS é apresentado na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1°	3,73	663,59	1,24	336,63	66,91%	49,27%
2°	7,38	1238,90	2,44	591,62	66,97%	52,25%
3°	11,77	1875,03	3,88	872,01	67,03%	53,49%
4°	15,87	2429,54	5,25	1056,88	66,93%	56,50%
5°	19,63	2988,25	6,53	1173,24	66,73%	60,74%
6°	22,97	3607,12	7,70	1319,66	66,48%	63,42%
7°	28,58	4492,25	9,76	1550,91	65,85%	65,48%
8°	35,13	5594,19	12,17	1958,19	65,36%	65,00%
9°	42,41	6570,78	14,89	2305,32	64,90%	64,92%
10°	46,19	7096,47	16,28	2684,01	64,76%	62,18%

Pode-se observar na Tabela 5.11, uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 66% e nas acelerações de aproximadamente 59%.

Na Figura 5.7 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações referentes ao último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelo algoritmo *Firefly*, definidos na Tabela 5.10.

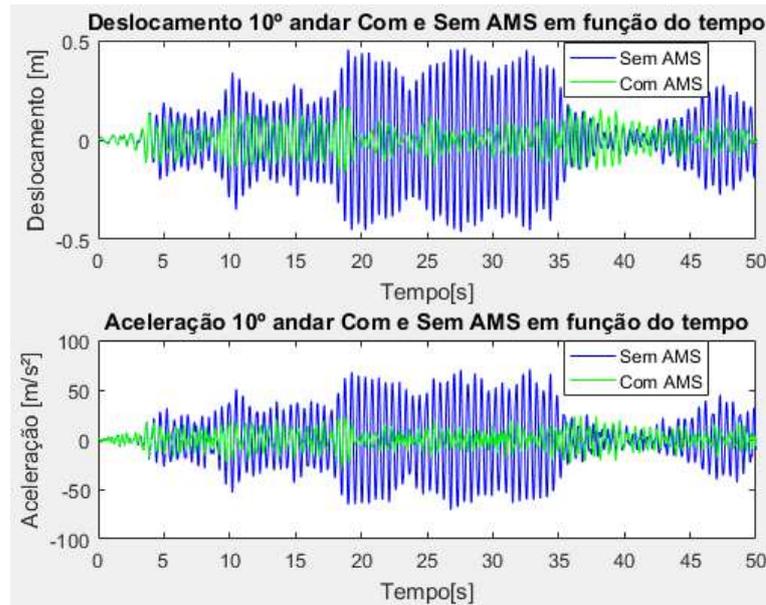


Figura 5.7 - Deslocamentos e acelerações do último andar

5.4.2.2 Algoritmo *Backtracking Search Optimization* - BSA

O tamanho populacional para o algoritmo *Backtracking Search Optimization Algorithm* (BSA) adotado correspondeu a 10 indivíduos, com 50 iterações. Assim, perfazendo o número total de 500 avaliações. Não são adotadas restrições ao algoritmo. O melhor resultado foi encontrado quando a razão de massa modal (μ) é 0,03, rigidez 0,9996 e amortecimento 0,3906. Os valores adotados para os parâmetros AMS como massa, rigidez, amortecimento e razão de amortecimento são apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Valores ótimos do AMS para μ de 0,03, rigidez 0,9996 e amortecimento 0,3906

Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
23198	56908	3396594	1,93

Como se pode observar nesta Tabela 5.12, a frequência resultante para o AMS foi de 1,93Hz, ou seja, coincidente com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Assim como nos demais casos, após acoplar o AMS no último andar, com as características apresentadas na Tabela 5.12, é refeita a análise dinâmica da estrutura para a verificação das amplitudes de vibração da mesma. Um comparativo entre as respostas da estrutura, sem e com AMS é apresentado

Tabela 5.13 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1°	3,73	663,59	1,24	337,75	66,91%	49,10%
2°	7,38	1238,90	2,44	593,85	67,01%	52,07%
3°	11,77	1875,03	3,88	875,32	67,03%	53,32%
4°	15,87	2429,54	5,25	1060,95	66,93%	56,33%
5°	19,63	2988,25	6,54	1177,67	66,69%	60,59%
6°	22,97	3607,12	7,71	1316,75	66,44%	63,50%
7°	28,58	4492,25	9,76	1553,28	65,84%	65,42%
8°	35,13	5594,19	12,17	1962,89	65,34%	64,91%
9°	42,41	6570,78	14,90	2317,18	64,88%	64,74%
10°	46,19	7096,47	16,29	2697,60	64,74%	61,99%

Pode se observar na Tabela 5.13, uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 66% e nas acelerações de aproximadamente 60%.

Na Figura 5.8 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações do último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelo algoritmo BSA.

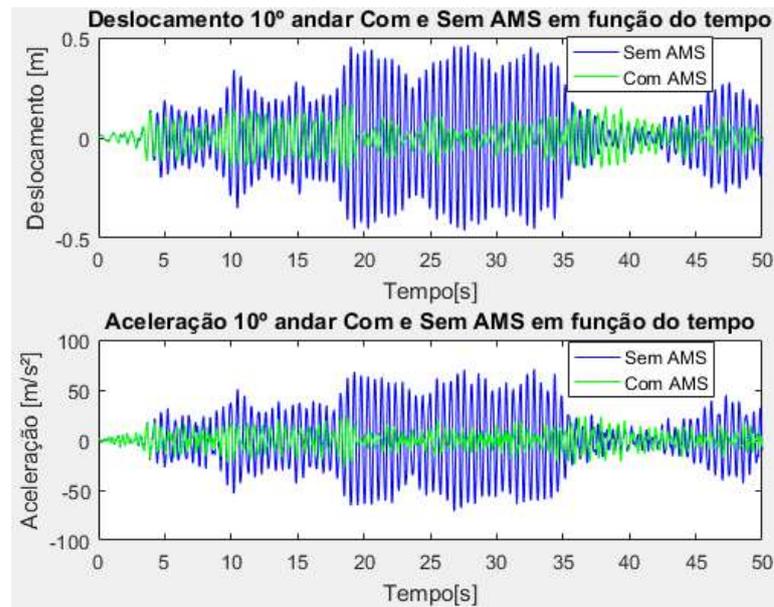


Figura 5.8 - Deslocamentos e acelerações do último andar

Pode-se observar que neste caso o algoritmo BSA obteve a melhor resposta com um número de avaliações 10 vezes menor que o algoritmo FA, quando os algoritmos são parametrizados com as mesmas variáveis de projeto. Desta forma o algoritmo BSA apresenta, a melhor solução com um tempo computacional mais baixo.

5.4.3 Análise Dinâmica Com Um Único AMS Três Variáveis De Projeto Diretamente (Sem o Método De Villaverde)

Devido ao fato de que nas próximas seções será feito o dimensionamento dos parâmetros de múltiplos AMS diretamente com a relação de massas, rigidez e amortecimento, ou seja, sem a utilização do método de Villaverde (o qual leva em consideração a massa modal), será feito o dimensionamento de um único AMS com os três parâmetros como variáveis de projeto, visando novamente o comparativo posterior de ambas as modalidades de aplicação dos AMS (Um e Múltiplos). No entanto, como mencionado na seção anterior, serão adotados os valores médios dos encontrados com a utilização do método de Villaverde para embasamento dos valores adotados de acordo com as bibliografias. Desta forma, podem-se definir os limites inferior e superior das variáveis de projeto como sendo:

- Relação de massa de 0,0 a 0,03, sendo diretamente o percentual da massa total da estrutura;
- Rigidez de 3×10^6 a 4×10^6 N/m
- Amortecimento de 1×10^4 a 1×10^5 Ns/m

5.4.3.1 Algoritmo *Firefly* - FA

Assim como nos casos anteriores, para o algoritmo *Firefly* foram adotadas 500 avaliações, sem restrições ao algoritmo. E o melhor resultado encontrado se dá quando a razão de massa (μ) é 0,02225, rigidez 3279383 N/m e amortecimento 82406 Ns/m. Os valores adotados para os parâmetros do AMS como massa, rigidez, amortecimento e razão de amortecimento são apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Valores ótimos do AMS para μ de 0,02225

Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
23367	82406	3279383	1,89

Como se pode observar na Tabela 5.14, a frequência resultante para o AMS foi de 1,89 Hz, ou seja, muito próxima da frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Da mesma forma que nos casos anteriores, a resposta da estrutura após a instalação do AMS com as características apresentadas na Tabela 5.14 é refeita. Um comparativo entre as respostas da estrutura, sem e com AMS é apresentado a Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1º	3,73	663,59	1,31	317,26	64,89%	52,19%
2º	7,38	1238,90	2,59	562,01	64,95%	54,64%
3º	11,77	1875,03	4,11	829,14	65,03%	55,78%
4º	15,87	2429,54	5,55	1014,55	65,02%	58,24%
5º	19,63	2988,25	6,90	1185,07	64,87%	60,34%
6º	22,97	3607,12	8,13	1345,36	64,62%	62,70%
7º	28,58	4492,25	10,26	1544,16	64,09%	65,63%
8º	35,13	5594,19	12,73	1887,20	63,77%	66,26%
9º	42,41	6570,78	15,52	2343,62	63,41%	64,33%
10º	46,19	7096,47	17,00	2647,35	63,19%	62,69%

Com o objetivo de verificar a resposta da estrutura com um maior número de avaliações com a utilização do algoritmo *Firefly* para a determinação dos parâmetros do AMS, visto que o mesmo não ficou com parâmetro relação de massa próximo ao limite superior adotado, é feita uma simulação com 5000 iterações, ou seja, 10 vezes maior que o caso anterior. No entanto, como se pode observar na Tabela 5.16, a redução quanto aos deslocamentos e acelerações em todos os andares não é tão relevante (média de 3,1% para os deslocamentos e de 1,3% para acelerações) a ponto de se adotar um maior número de avaliações, visto que o tempo computacional para rodar os dois casos foi de 4 minutos para 500 iterações e 40 minutos para as 5000 iterações.

Fazendo um comparativo entre os parâmetros do AMS com ambas as avaliações, se verifica um aumento considerável (15% para a massa, e 22% para rigidez), conforme pode ser visto na Tabela 5.17.

Tabela 5.16 - Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500 e 5000 avaliações

Andar	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
1º	3,06%	-0,42%
2º	3,08%	0,96%
3º	3,09%	1,35%
4º	3,11%	1,80%
5º	3,13%	2,64%
6º	3,15%	2,86%
7º	3,18%	1,11%
8º	3,17%	0,52%
9º	3,10%	1,59%
10º	2,95%	0,54%

Tabela 5.17 - Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500 e 5000 avaliações

Avaliações	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
500	23367	82406	3279383	1,89
5000	26834	85326	3999895	1,94
Incremento	14,83%	3,54%	21,97%	-

Desta forma, será adotado o valor referente a 500 avaliações. Pode se observar na Tabela 5.15, uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 64% e nas acelerações de aproximadamente 60%.

Na Figura 5.9 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações referentes ao último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelo algoritmo *Firefly*, definidos na Tabela 5.14.

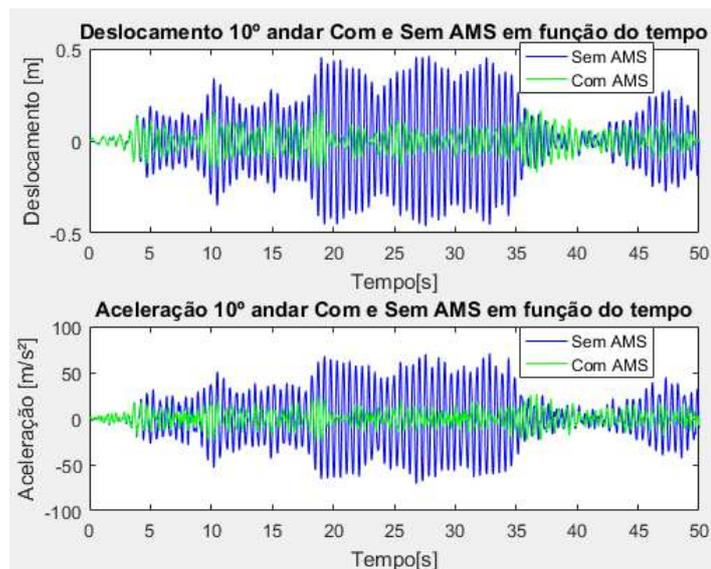


Figura 5.9 - Deslocamentos e acelerações do último andar

5.4.3.2 Algoritmo *Backtracking Search Optimization* - BSA

Em virtude da avaliação anterior quanto ao tempo computacional e a não redução considerável quanto à resposta da estrutura frente à variação do número de iterações, o número total de avaliações para o algoritmo BSA neste caso será de 500, sem restrições. O melhor resultado com o algoritmo é encontrado quando a razão de massa (μ) é 0,02549, rigidez 3,9913MN/m e amortecimento 82219Ns/m. Os valores adotados para os parâmetros do AMS como massa, rigidez, amortecimento e razão de amortecimento são apresentados na Tabela 5.18. Como se pode observar nesta Tabela 5.18, a frequência resultante para o AMS foi de 1,94Hz, ou seja, muito próxima da frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Tabela 5.18 - Valores ótimos do AMS para μ de 0,02549

Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
26763	82219	3991334	1,94

Após acoplar o AMS no último andar, com as características apresentadas na Tabela 5.18, é refeita a análise dinâmica da estrutura para a verificação das amplitudes de vibração da mesma. Um comparativo entre as respostas da estrutura, sem e com AMS é apresentado na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1º	3,73	663,59	1,19	322,28	68,00%	51,43%
2º	7,38	1238,90	2,36	554,42	68,08%	55,25%
3º	11,77	1875,03	3,74	810,53	68,17%	56,77%
4º	15,87	2429,54	5,05	978,95	68,18%	59,71%
5º	19,63	2988,25	6,27	1106,13	68,05%	62,98%
6º	22,97	3607,12	7,39	1238,82	67,82%	65,66%
7º	28,58	4492,25	9,34	1495,65	67,31%	66,71%
8º	35,13	5594,19	11,60	1858,50	66,97%	66,78%
9º	42,41	6570,78	14,19	2250,12	66,53%	65,76%
10º	46,19	7096,47	15,73	2621,62	65,95%	63,06%

Pode-se observar na Tabela 5.19 uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 68% e nas acelerações de aproximadamente 61%.

Na Figura 5.10 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações do último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelo algoritmo BSA.

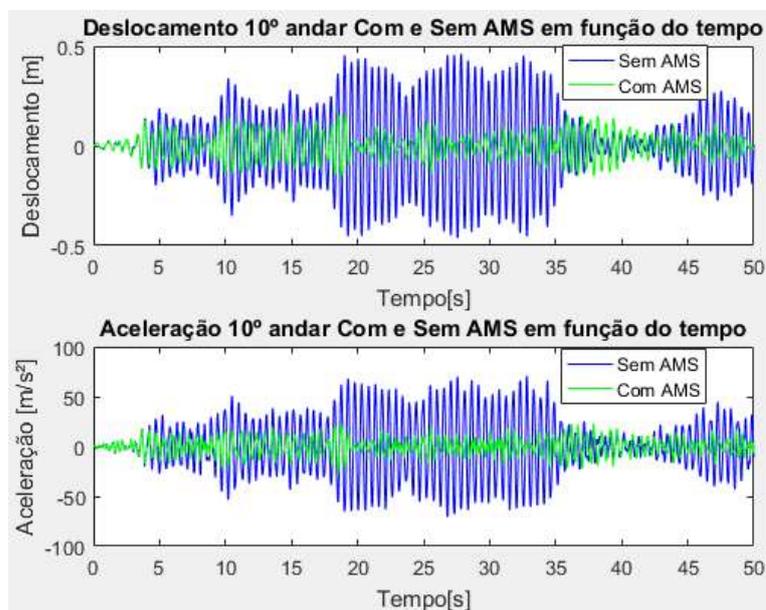


Figura 5.10 - Deslocamentos e acelerações do último andar

Vale salientar que com o algoritmo BSA o tempo gasto para encontrar a solução ótima, considerando os mesmos parâmetros que o algoritmo *Firefly*, foi de 1,5 minutos, ou seja, 37,5% do tempo gasto com o *Firefly* que foi de 4 minutos.

5.4.4 Análise Dinâmica Com Múltiplos AMS (1 Por Andar) Com Relação de Massas Iguais

Assim como realizado para um único AMS, é realizado o dimensionamento dos parâmetros de múltiplos AMS diretamente com a relação de massas, rigidez e amortecimento, sendo os três parâmetros considerados como variáveis de projeto, conforme já mencionado anteriormente, porém considerando as massas dos AMS iguais, o que totaliza 21 variáveis de projeto. Os valores adotados para os limites inferior e superior se dão com base nos valores encontrados para um único AMS. Estes são valores médios, ou seja, uma faixa de valores visando seguir as referências bibliográficas. A determinação destes limites de projeto se dá

através da divisão por 10 dos limites mínimos e máximos adotados para um único AMS, visto que nesta seção são adotados 10 AMS (um para cada andar).

As variáveis de projeto adotadas possuem os seguintes limites inferior e superior, respectivamente:

- Relação de massa de 0,0 a 0,003, sendo diretamente o percentual da massa total da estrutura sendo igual para todos os andares;
- Rigidez de 3×10^5 a 4×10^5 N/m;
- Amortecimento de 1×10^3 a 1×10^4 Ns/m.

Vale salientar que nesta opção de múltiplos AMS são 21 variáveis de projeto, pois as relações de massas, as quais são consideradas iguais para todos os andares, podem se resumir a uma única; as demais variáveis de projeto são 10 para rigidez e 10 para amortecimento.

5.4.4.1 Algoritmo *Firefly* - FA

Foram adotadas 500 avaliações para o algoritmo *Firefly*, sem a adoção de restrições, assim como nos casos anteriores. A melhor resposta da estrutura quanto aos deslocamentos se dá quando a razão de massa (μ) é 0,002259, sendo igual para os 10 AMS (10 andares). Os valores adotados para os parâmetros como massa, rigidez e amortecimento são apresentados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Valores ótimos do AMS para μ de 0,002259

Andar	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
1	2372	5532	338652	1,90
2	2372	5683	340076	1,91
3	2372	5674	348270	1,93
4	2372	5381	319661	1,85
5	2372	7332	351132	1,94
6	2372	4228	370951	1,99
7	2372	5838	368081	1,98
8	2372	6452	353621	1,94
9	2372	7031	336907	1,90
10	2372	6311	340948	1,91

Igualmente à verificação realizada no caso anterior para um único AMS, efetuou-se a variação do número de avaliações, visando à busca da melhor resposta em termos de deslocamentos, acelerações, e menor relação de massas adotada. Neste caso, foram adotadas três opções de variação, sendo 500, 1000 e 5000 avaliações. Na Tabela 5.21 são apresentadas as variações em percentual frente aos deslocamentos e acelerações para os casos de 1000 e 5000 respectivamente, quando comparados aos resultados obtidos através da utilização de 500 avaliações, na qual se verifica que a redução dos deslocamentos e acelerações também não é considerável (média de 0,00% para os deslocamentos e de -0,08% para as acelerações, para 1000 avaliações e de 1,05% para os deslocamentos e de 0,99% para as acelerações, para 5000 avaliações) a ponto de se adotar um número maior de avaliações. O percentual de aumento de massa, rigidez e amortecimento não é considerável, comparado ao caso anterior, de acordo com o aumento do número de avaliações, conforme se pode verificar na Tabela 5.22.

Tabela 5.21 - Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações

Andar	1000 avaliações		5000 avaliações	
	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
1º	0,02%	0,09%	0,79%	0,88%
2º	0,18%	-0,27%	1,00%	1,07%
3º	0,10%	-0,29%	1,01%	1,07%
4º	0,02%	-0,31%	1,16%	1,04%
5º	0,01%	-0,32%	1,17%	0,96%
6º	0,01%	0,03%	1,18%	0,37%
7º	0,00%	0,33%	1,17%	1,05%
8º	-0,15%	-0,04%	0,94%	1,25%
9º	-0,11%	0,01%	1,02%	1,08%
10º	-0,06%	-0,01%	1,05%	1,10%

Tabela 5.22 - Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações

Avaliações	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
500	23717	59461	3468299	1,92
1000	23874	60515	3510051	1,93
Incremento	0,66%	1,77%	1,20%	-
5000	25269	67951	3686808	1,92
Incremento	6,55%	14,28%	6,30%	-

Como se pode observar nesta Tabela 5.22, a frequência resultante para o AMS ficou entre 1,92 e 1,93Hz, e na Tabela 5.20 a média das frequências resultantes para o AMS ficou em 1,92Hz, ou seja, coincidente com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Um fator relevante para a determinação dos parâmetros ótimos é o tempo computacional dispendido para a realização da otimização. Os tempos gastos para o caso em estudo, com as três opções de número de avaliações distintas, são apresentados na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 - Tempo para otimização algoritmo *Firefly*

Avaliações	Tempo em segundos
500	205
1000	408
5000	2044

Logo, são adotados os parâmetros referentes a 500 avaliações. Observa-se na Tabela 5.24, uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 66% e nas acelerações de aproximadamente 58%.

Tabela 5.24 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1º	3,73	663,59	1,24	330,69	66,76%	50,17%
2º	7,38	1238,90	2,47	619,25	66,58%	50,02%
3º	11,77	1875,03	3,95	924,12	66,45%	50,71%
4º	15,87	2429,54	5,36	1123,49	66,22%	53,76%
5º	19,63	2988,25	6,69	1242,99	65,93%	58,40%
6º	22,97	3607,12	7,89	1369,34	65,67%	62,04%
7º	28,58	4492,25	9,94	1585,71	65,23%	64,70%
8º	35,13	5594,19	12,35	2000,07	64,85%	64,25%
9º	42,41	6570,78	15,19	2327,08	64,18%	64,58%
10º	46,19	7096,47	16,65	2749,21	63,95%	61,26%

Na Figura 5.11 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações referentes ao último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelo algoritmo *Firefly*, definidos na Tabela 5.20.

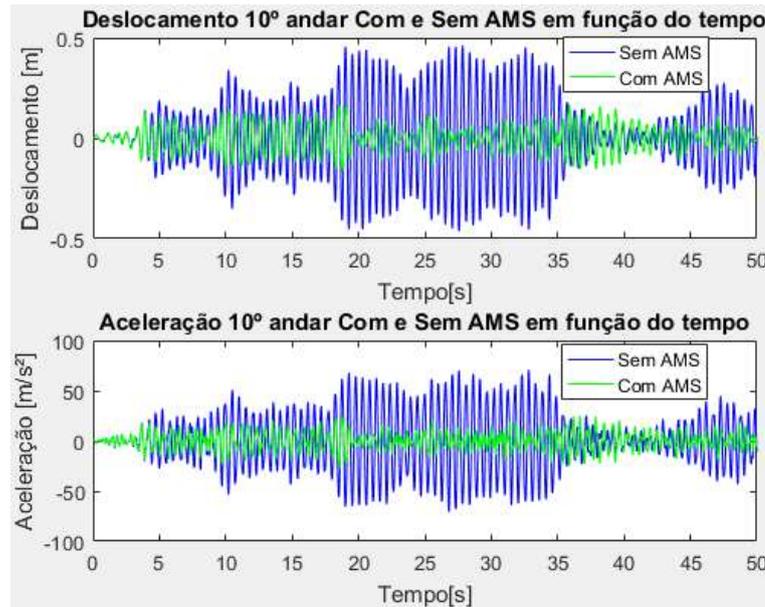


Figura 5.11 - Deslocamentos e acelerações do último andar

5.4.4.2 Algoritmo *Backtracking Search Optimization* – BSA

Para a análise das reduções nos deslocamentos e acelerações com a utilização do algoritmo BSA para o caso de 10 AMS com massas iguais, foram realizadas as três opções de número de avaliações, assim como feito com o algoritmo *Firefly*.

Na Tabela 5.25 são apresentadas as variações em percentual frente aos deslocamentos e acelerações para os casos de 1000 e 5000 respectivamente, quando comparados aos resultados obtidos através da utilização de 500 avaliações, na qual se verifica que a redução dos deslocamentos e acelerações também não é considerável (média de 0,77% para os deslocamentos e de 0,82% para as acelerações, para 1000 avaliações e de 1,14% para os deslocamentos e de 1,04% para as acelerações, para 5000 avaliações) a ponto de se adotar um número maior de avaliações. O percentual de aumento de massa, rigidez e amortecimento neste caso aumenta à medida que aumenta o número de avaliações, porém, não são consideráveis as reduções dos deslocamentos e das acelerações frente aos parâmetros, conforme se pode verificar na Tabela 5.26.

Tabela 5.25 - Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações

Andar	1000 avaliações		5000 avaliações	
	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
1º	0,69%	0,49%	0,97%	1,10%
2º	0,68%	1,22%	0,98%	0,88%
3º	0,63%	1,25%	1,00%	0,87%
4º	0,72%	1,25%	1,05%	0,82%
5º	0,85%	0,54%	1,17%	0,73%
6º	0,82%	-0,72%	1,16%	0,09%
7º	0,77%	0,50%	1,16%	1,23%
8º	0,82%	1,10%	1,24%	1,51%
9º	0,94%	1,24%	1,35%	1,52%
10º	0,77%	1,30%	1,37%	1,61%

Tabela 5.26 - Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações

Avaliações	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
500	24185	66914	3607511	1,94
1000	24706	71416	3634740	1,93
Incremento	2,15%	6,73%	0,75%	-
5000	26158	76713	3808558	1,92
Incremento	8,15%	14,64%	5,57%	-

Como se pode observar nesta Tabela 5.26, a frequência resultante para o AMS ficou entre 1,92 e 1,94Hz, e na Tabela 5.27 a média das frequências resultantes para o AMS ficou em 1,94Hz, ou seja, coincidente ou muito próxima com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Por consequência, para o caso avaliado com o auxílio do algoritmo BSA, são adotados os parâmetros obtidos através de 500 avaliações. A melhor resposta da estrutura quanto aos deslocamentos se dá quando a razão de massa (μ) é 0,02303, sendo igual para os 10 AMS (10 andares). Os valores adotados para os parâmetros como massa, rigidez e amortecimento são apresentados na Tabela 5.27.

Tabela 5.27 - Valores ótimos do AMS para μ de 0,02303

Andar	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
1	2419	9140	390879	2,02
2	2419	9365	389196	2,02
3	2419	5870	356852	1,93
4	2419	10000	400000	2,05
5	2419	7531	309333	1,80
6	2419	3779	317492	1,82
7	2419	5919	377580	1,99
8	2419	2725	338941	1,88
9	2419	4691	358241	1,94
10	2419	7893	368997	1,97

Os tempos computacionais utilizados para o caso em estudo, para as três opções de número de avaliações, são apresentados na Tabela 5.28.

Tabela 5.28 - Tempo para otimização algoritmo BSA

Avaliações	Tempo em segundos
500	159
1000	317
5000	1605

Portanto, ao adotar os parâmetros definidos na Tabela 5.27, obtém-se uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 66% e nas acelerações de aproximadamente 59%, conforme se pode observar na Tabela 5.29.

Tabela 5.29 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1º	3,73	663,59	1,25	326,43	66,54%	50,81%
2º	7,38	1238,90	2,47	602,85	66,59%	51,34%
3º	11,77	1875,03	3,93	899,31	66,62%	52,04%
4º	15,87	2429,54	5,32	1092,32	66,51%	55,04%
5º	19,63	2988,25	6,63	1207,78	66,22%	59,58%
6º	22,97	3607,12	7,82	1353,81	65,96%	62,47%
7º	28,58	4492,25	9,89	1571,29	65,39%	65,02%
8º	35,13	5594,19	12,33	1973,21	64,89%	64,73%
9º	42,41	6570,78	15,16	2306,62	64,26%	64,90%
10º	46,19	7096,47	16,61	2730,94	64,03%	61,52%

Do mesmo modo que nas demais opções, na Figura 5.12 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações referentes ao último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelo algoritmo BSA, definidos na Tabela 5.27.

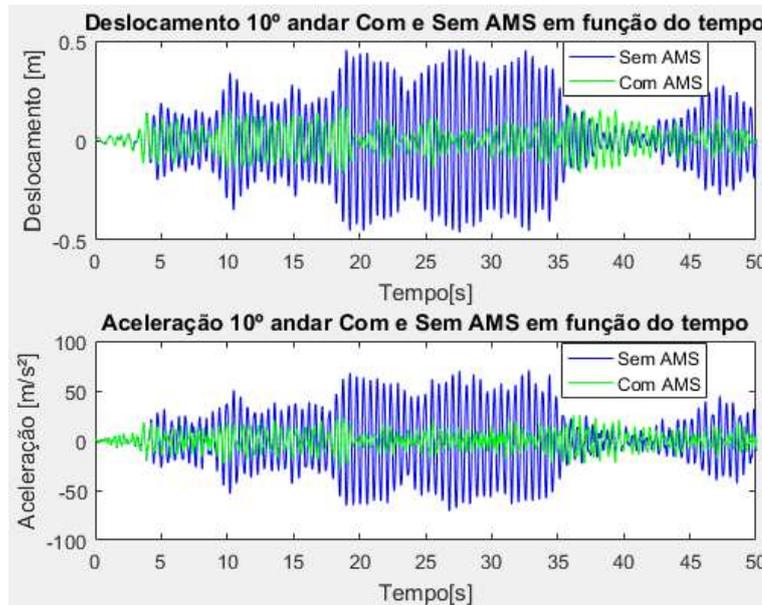


Figura 5.12 - Deslocamentos e acelerações do último andar

5.4.5 Análise Dinâmica Com Múltiplos AMS (1 Por Andar) Com Relação de Massas Diferentes

Este caso é semelhante ao anterior, diferenciando no fato de as massas para cada um dos AMS serem determinadas de forma independente, ou seja, sem a obrigatoriedade de todas serem iguais, o que totaliza 30 variáveis de projeto.

Quanto aos limites inferior e superior para as variáveis de projeto, estes são idênticos aos adotados no caso anterior, sendo limite inferior e superior, respectivamente:

- Relação de massa de 0,0 a 0,003, sendo diretamente o percentual da massa total da estrutura de forma livre (sem igualdade) para todos os andares;
- Rigidez de 3×10^5 a 4×10^5 N/m;
- Amortecimento de 1×10^3 a 1×10^4 Ns/m.

Vale salientar que nesta opção de múltiplos AMS, as variáveis de projeto serão 30, sendo as 10 primeiras as relações de massas, 10 para rigidez e 10 para amortecimento.

Além de realizar a variação de massas para cada um dos andares, nesta opção também é feita a análise com ambos os algoritmos com 500, 1000 e 5000 avaliações.

5.4.5.1 Algoritmo *Firefly* - FA

Com a utilização do algoritmo *Firefly* para otimização dos parâmetros, são apresentadas na Tabela 5.30 as variações em percentual frente aos deslocamentos e acelerações para os casos de 1000 e 5000 respectivamente, quando comparados aos resultados obtidos através da utilização de 500 avaliações, na qual se verifica que a redução dos deslocamentos e acelerações é considerável (média de 4,11% para os deslocamentos e de 1,83% para as acelerações, para 1000 avaliações e de 5,21% para os deslocamentos e de 2,54% para as acelerações, para 5000 avaliações) a ponto de se adotar um número maior de avaliações, mesmo tendo o percentual de aumento de massa relativamente alto, mas considerando que a massa total determinada com 500 avaliações foi baixa (21119kg). Os percentuais de rigidez diminuem muito pouco, no entanto o percentual de amortecimento tem um incremento considerável. Desta forma são consideráveis as reduções dos deslocamentos e das acelerações frente à variação dos parâmetros, conforme se pode verificar na Tabela 5.31.

Tabela 5.30 - Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações

Andar	1000 avaliações		5000 avaliações	
	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
1º	3,70%	-1,01%	4,58%	-0,67%
2º	3,52%	-1,18%	4,41%	0,42%
3º	3,25%	-2,25%	4,16%	-0,58%
4º	2,96%	1,38%	3,89%	3,10%
5º	2,89%	4,03%	3,84%	4,31%
6º	3,17%	2,54%	4,15%	2,88%
7º	4,30%	0,84%	5,34%	1,28%
8º	5,42%	2,37%	6,67%	2,97%
9º	5,80%	5,72%	7,30%	5,86%
10º	6,11%	5,90%	7,73%	5,80%

Tabela 5.31 - Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações

Avaliações	Massa [kg]	Amortecimento	Rigidez [N/m]	Frequência
500	21119	55528	3480091	2,04
1000	23554	45540	3542298	1,95
Incremento	11,53%	-17,99%	1,79%	-
5000	24389	47638	3511894	1,91
Incremento	15,48%	-14,21%	0,91%	-

Como se pode observar nesta Tabela 5.31, a frequência resultante para o AMS ficou entre 1,91 e 2,04Hz, e na Tabela 6.34 a média das frequências resultantes para o AMS ficou em 1,92Hz, ou seja, coincidente ou muito próxima com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Visando ainda levar em consideração o tempo computacional, na Tabela 5.32, são apresentados os tempos gastos para cada uma das opções de número de avaliações.

Tabela 5.32 - Tempo para otimização algoritmo *Firefly*

Avaliações	Tempo em
500	205
1000	416
5000	2145

À vista disto, ou seja, os três fatores relevantes para a escolha da melhor opção, duas determinam que a opção a adotar é a de 5000 avaliações. Na Tabela 5.33 são apresentados os valores ótimos para a relação de massas (μ) a qual fica entre 0,001878 e 0,002841 da massa total da estrutura.

Tabela 5.33 - Relações de massas diferentes para os andares - algoritmo *Firefly*

Andar	Relação de Massa [μ]
1	0,001878
2	0,002294
3	0,002084
4	0,001877
5	0,002841
6	0,002520
7	0,002214
8	0,002375
9	0,002547
10	0,002597

Na Tabela 5.34, são apresentados os valores adotados para os parâmetros como massa, rigidez e amortecimento.

Tabela 5.34 - Valores ótimos do AMS para as relações de massas μ

Andar	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
1	1972	2079	346578	2,11
2	2409	3705	337836	1,88
3	2188	3189	381002	2,10
4	1971	1000	348091	2,12
5	2983	5469	337075	1,69
6	2646	7722	319628	1,75
7	2324	8227	345312	1,94
8	2494	7125	341202	1,86
9	2675	1000	375504	1,89
10	2726	8122	379666	1,88

Conseqüentemente, observa-se na Tabela 5.35, uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 67% e nas acelerações de aproximadamente 59%.

Tabela 5.35 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1°	3,73	663,59	1,24	329,42	66,89%	50,36%
2°	7,38	1238,90	2,44	603,81	66,89%	51,26%
3°	11,77	1875,03	3,90	896,42	66,88%	52,19%
4°	15,87	2429,54	5,26	1080,82	66,89%	55,51%
5°	19,63	2988,25	6,49	1231,18	66,97%	58,80%
6°	22,97	3607,12	7,55	1425,59	67,12%	60,48%
7°	28,58	4492,25	9,28	1597,53	67,52%	64,44%
8°	35,13	5594,19	11,18	1818,61	68,16%	67,49%
9°	42,41	6570,78	13,64	2123,39	67,85%	67,68%
10°	46,19	7096,47	15,02	2560,74	67,48%	63,92%

Na Figura 5.13 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações referentes ao último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelo algoritmo *Firefly*, definidos na Tabela 5.34.

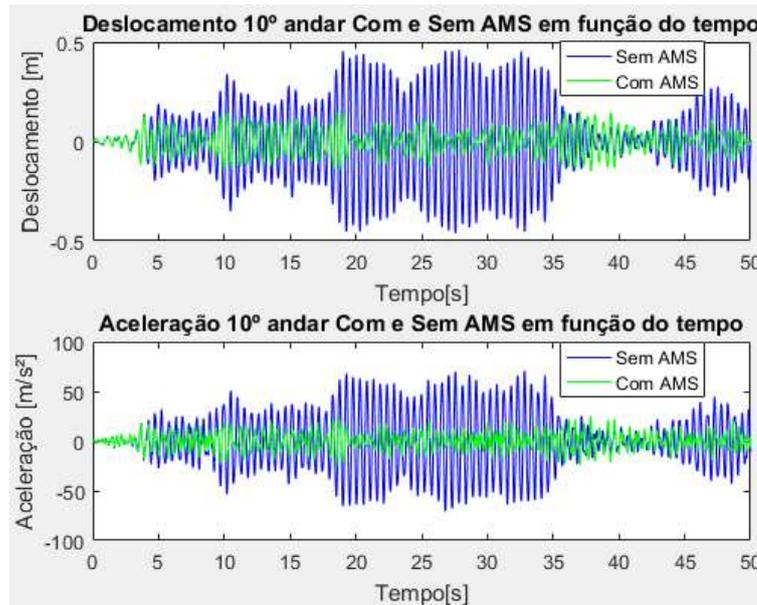


Figura 5.13 - Deslocamentos e acelerações do último andar

5.4.5.2 Algoritmo *Backtracking Search Optimization* – BSA

Análise semelhante à realizada com o FA é feita com o BSA. Na Tabela 5.36 são apresentadas as variações em percentual dos deslocamentos e acelerações para os casos de 1000 e 5000 respectivamente, quando comparados com os resultados obtidos através da utilização de 500 avaliações, na qual se verifica que a redução dos deslocamentos e acelerações também não é considerável (média de 1,33% para os deslocamentos e de 0,50% para as acelerações, para 1000 avaliações e de 2,15% para os deslocamentos e de 2,45% para as acelerações, para 5000 avaliações). Apesar de a massa e o amortecimento oscilarem entre incremento e redução, e a rigidez aumentar em ambas as avaliações, não são consideráveis as reduções dos parâmetros frente às reduções de deslocamentos e acelerações, conforme se pode verificar na Tabela 5.37.

Tabela 5.36 - Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações

Andar	1000 avaliações		5000 avaliações	
	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
1º	1,83%	-0,89%	2,93%	2,06%
2º	1,73%	0,95%	2,69%	4,03%
3º	1,72%	0,77%	2,38%	3,96%
4º	1,85%	0,48%	2,12%	3,71%
5º	2,03%	0,12%	1,89%	3,21%
6º	1,94%	1,18%	1,73%	3,33%
7º	1,28%	1,30%	1,55%	2,50%
8º	0,43%	-1,24%	1,63%	-0,56%
9º	0,25%	0,19%	2,12%	1,09%
10º	0,22%	2,15%	2,50%	1,19%

Tabela 5.37 - Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações

Avaliações	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
500	24949	30465	3515109	1,89
1000	26964	50093	3596403	1,84
Incremento	8,07%	64,43%	2,31%	-
5000	24371	27061	3578349	1,93
Incremento	-2,32%	-11,17%	1,80%	-

Como se pode observar nesta Tabela 5.37, a frequência resultante para o AMS ficou entre 1,89 e 1,93Hz, e na Tabela 5.40 a média das frequências resultantes para o AMS ficou em 2,01Hz, ou seja, coincidente ou muito próxima com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Visando ainda analisar o tempo computacional, na Tabela 5.38 são apresentados os tempos gastos para cada uma das opções de número de avaliações.

Tabela 5.38 - Tempo para otimização algoritmo BSA

Avaliações	Tempo em segundos
500	168
1000	318
5000	1583

Portanto, a melhor resposta frente a deslocamentos, acelerações, bem como menor relação de massa é a opção de 500 avaliações. Na Tabela 5.39 são apresentados os valores

ótimos para a relação de massas (μ) a qual fica entre 0,000671 e 0,0030 da massa total da estrutura.

Tabela 5.39 - Relações de massas diferentes andares algoritmo BSA

Andar	Relação de Massa [μ]
1	0,003000
2	0,003000
3	0,003000
4	0,003000
5	0,002074
6	0,000671
7	0,001555
8	0,002798
9	0,003000
10	0,001663

Na Tabela 5.40 são apresentados os valores adotados para os parâmetros como massa, rigidez e amortecimento.

Tabela 5.40 - Valores ótimos do AMS para as relações de massas μ

Andar	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
1	3150	1000	365111	1,71
2	3150	7887	394322	1,78
3	3150	4098	307661	1,57
4	3150	4402	400000	1,79
5	2178	1774	394278	2,14
6	705	2072	300000	3,28
7	1633	6233	316657	2,22
8	2937	1000	395226	1,85
9	3150	1000	323456	1,61
10	1746	1000	318399	2,15

Conseqüentemente, observa-se na Tabela 5.41 uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 65% e nas acelerações de aproximadamente 58%.

Tabela 5.41 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1º	3,73	663,59	1,34	324,92	64,23%	51,04%
2º	7,38	1238,90	2,63	656,87	64,42%	46,98%
3º	11,77	1875,03	4,16	976,87	64,66%	47,90%
4º	15,87	2429,54	5,58	1182,19	64,87%	51,34%
5º	19,63	2988,25	6,85	1297,42	65,10%	56,58%
6º	22,97	3607,12	7,96	1443,11	65,33%	59,99%
7º	28,58	4492,25	9,80	1624,33	65,72%	63,84%
8º	35,13	5594,19	11,87	1758,62	66,20%	68,56%
9º	42,41	6570,78	14,45	2190,73	65,94%	66,66%
10º	46,19	7096,47	15,86	2572,32	65,67%	63,75%

Na Figura 5.14 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações referentes ao último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelo algoritmo BSA, definidos na Tabela 5.40.

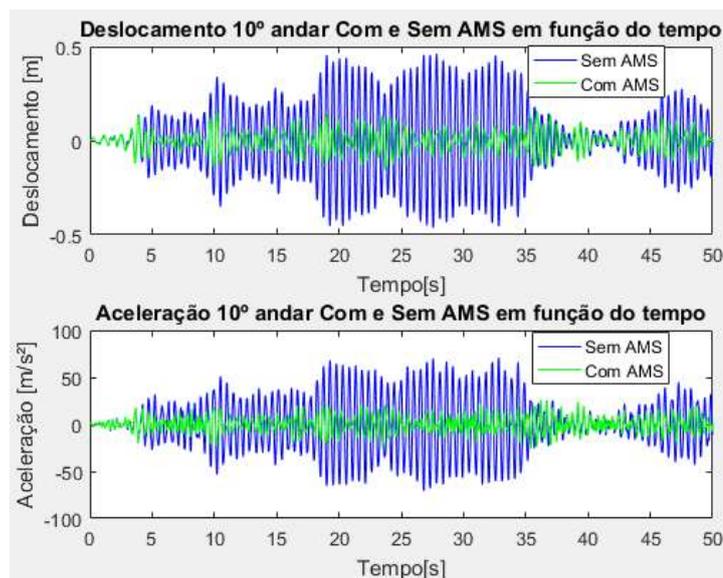


Figura 5.14 - Deslocamentos e acelerações do último andar

5.4.6 Análise Dinâmica Com Múltiplos AMS Com Relação de Massas Diferentes, Melhor Resposta Sem AMS em 4 Andares

Nas seções anteriores as variáveis de projeto foram definidas quanto ao número e posição para a instalação dos AMS. No entanto, nesta seção a otimização inicia com um sistema de configuração universal com todos os AMS's localizados em todos os pisos da estrutura, sendo um total de 30 variáveis de projeto, das quais 12 serão eliminadas ou zeradas. Então o

procedimento de otimização é empregado para descartar os dispositivos desnecessários. Este procedimento é muito utilizado para evitar a predefinição da localização dos AMS's. Para a definição da posição dos AMS são adotados como limitantes para ambos os algoritmos o número de 6 AMS de um total de 10 (1 por andar), permitindo assim a redução de 30 para 18 variáveis de projeto. Ao obter-se a melhor posição para os 6 AMS, o programa é redefinido com esta configuração onde vai viabilizar os parâmetros para a melhor resposta frente aos deslocamentos, acelerações e relação de massas para um número maior de avaliações, totalizando assim 18 variáveis de projeto. O número de avaliações inicial para ambos os algoritmos é de 500, como adotado nos casos anteriores.

Igualmente ao caso anterior, os parâmetros do AMS são determinados diretamente com a relação de massas, rigidez e amortecimento. As massas para cada um dos AMS são determinadas de forma independente, ou seja, sem a obrigatoriedade de todas serem iguais.

Os limites inferior e superior para as variáveis de projeto são, respectivamente:

- Relação de massa de 0,0 a 0,005, sendo diretamente o percentual da massa total da estrutura de forma livre (sem igualdade) para todos os andares;
- Rigidez de 5×10^5 a $6,667 \times 10^5 \text{ N/m}$
- Amortecimento de $1,667 \times 10^3$ a $1,667 \times 10^4 \text{ Ns/m}$

5.4.6.1 Verificação da Melhor Configuração

Para ambos os algoritmos FA e BSA distintamente, foram adotadas as mesmas premissas. As limitações para a definição da melhor configuração são os limites inferior e superior para as variáveis de projeto, conforme mencionado acima, bem como, a limitação de no máximo 6 AMS dispostos aleatoriamente.

A melhor configuração se deu quando não possuem AMS acoplados nos andares 2, 4, 6 e 8.

Algoritmo *Firefly* - FA

Na Tabela 5.42 são apresentadas as relações de massas para cada um dos andares.

Tabela 5.42 - Relações de massas diferentes andares algoritmo *Firefly*

Andar	Relação de Massa [μ]
1	0,003392
2	0,00
3	0,003972
4	0,00
5	0,003793
6	0,00
7	0,003093
8	0,00
9	0,004155
10	0,004379

Na Tabela 5.43, são apresentados os valores para os parâmetros como massa, rigidez e amortecimento, com a configuração definida pelo algoritmo *Firefly*.

Tabela 5.43 - Valores ótimos do AMS para as relações de massas μ

Andar	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
1	3561	8158	601170	2,07
2	0	0	0	-
3	4171	9397	600233	1,91
4	0	0	0	-
5	3982	9725	599562	1,95
6	0	0	0	-
7	3248	5662	563971	2,10
8	0	0	0	-
9	4363	9767	577218	1,83
10	4597	12261	571664	1,77

Como se pode observar nesta Tabela 5.43, a frequência resultante para o AMS ficou entre 1,77 e 2,1Hz, média das frequências resultantes para o AMS ficou em 1,94Hz, ou seja, coincidente ou muito próxima com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Observa-se na Tabela 5.44 uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 66% e nas acelerações de aproximadamente 58%.

Tabela 5.44 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1º	3,73	663,59	1,22	330,75	67,28%	50,16%
2º	7,38	1238,90	2,43	616,17	67,11%	50,26%
3º	11,77	1875,03	3,88	918,02	66,98%	51,04%
4º	15,87	2429,54	5,25	1113,24	66,91%	54,18%
5º	19,63	2988,25	6,52	1227,42	66,79%	58,93%
6º	22,97	3607,12	7,66	1370,75	66,66%	62,00%
7º	28,58	4492,25	9,64	1593,58	66,26%	64,53%
8º	35,13	5594,19	12,01	1942,76	65,82%	65,27%
9º	42,41	6570,78	14,80	2265,56	65,09%	65,52%
10º	46,19	7096,47	16,31	2678,74	64,69%	62,25%

Algoritmo *Backtracking Search Optimization* – BSA

Na Tabela 5.45 são apresentadas as relações de massas para cada um dos andares.

Tabela 5.45 - Relações de massas diferentes andares algoritmo BSA

Andar	Relação de Massa [μ]
1	0,004617
2	0,00
3	0,004386
4	0,00
5	0,003193
6	0,00
7	0,003972
8	0,00
9	0,004835
10	0,003196

Na Tabela 5.46 são apresentados os valores para os parâmetros como massa, rigidez e amortecimento, com a configuração definida pelo algoritmo *Backtracking Search Optimization Algorithm*.

Tabela 5.46 - Valores ótimos do AMS para as relações de massas μ

Andar	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
1	4848	7320	666700	1,87
2	0	0	0	-
3	4605	5205	635096	1,87
4	0	0	0	-
5	3353	10881	641247	2,20
6	0	0	0	-
7	4171	16526	643705	1,98
8	0	0	0	-
9	5077	5037	517550	1,61
10	3355	1671	665654	2,24

Como se pode observar nesta Tabela 5.43, a frequência resultante para o AMS ficou entre 1,61 e 2,24Hz, média das frequências resultantes para o AMS ficou em 1,96Hz, ou seja, coincidente ou muito próxima com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Observa-se na Tabela 5.47 uma redução significativa nos deslocamentos de aproximadamente 65% e nas acelerações de aproximadamente 58%.

Tabela 5.47 - Deslocamentos e acelerações por andar

Andar	Sem AMS		Com AMS		Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)	Deslocamento (cm)	Aceleração (cm/s ²)		
1º	3,73	663,59	1,30	341,97	65,26%	48,47%
2º	7,38	1238,90	2,57	624,80	65,23%	49,57%
3º	11,77	1875,03	4,09	929,01	65,20%	50,45%
4º	15,87	2429,54	5,53	1123,26	65,16%	53,77%
5º	19,63	2988,25	6,84	1242,23	65,18%	58,43%
6º	22,97	3607,12	7,98	1438,60	65,26%	60,12%
7º	28,58	4492,25	9,85	1625,51	65,53%	63,82%
8º	35,13	5594,19	12,04	1745,57	65,71%	68,80%
9º	42,41	6570,78	14,70	2274,00	65,33%	65,39%
10º	46,19	7096,47	16,15	2650,41	65,04%	62,65%

5.4.6.2 Comparativo Maior Número de Avaliações

Após a obtenção da melhor configuração de distribuição dos 6 AMS com 500 avaliações para ambos os algoritmos, o programa é redefinido com a configuração selecionada, e são feitas mais duas obtenções de resultados com a variação de 1000 e 5000 avaliações, mantendo os mesmos limites inferior e superior para as variáveis de projeto. Esta verificação se faz necessária para a confirmação da melhor resposta quanto à variação do número de avaliações,

e visa obter um comparativo como nos casos anteriores, onde são levados em conta a menor relação de massas com a maior redução de deslocamentos e acelerações.

Algoritmo *Firefly* - FA

Na Tabela 5.48 são apresentadas as variações em percentual frente aos deslocamentos e acelerações para os casos de 1000 e 5000 respectivamente, quando comparados aos resultados obtidos através da utilização de 500 avaliações, na qual se verifica que a redução dos deslocamentos e acelerações também não é considerável (média de 0,93% para os deslocamentos e de 0,00% para as acelerações, para 1000 avaliações e de 1,26% para os deslocamentos e de 0,80% para as acelerações, para 5000 avaliações). As respostas da estrutura em termos de deslocamentos e acelerações reduzem em ambos os casos. O aumento da massa total dos AMS não é um aumento considerável. O amortecimento possui uma redução considerável, porém a rigidez oscila entre redução e aumento. As alterações dos parâmetros não refletem valores consideráveis de redução dos deslocamentos e das acelerações, conforme se pode verificar na Tabela 5.49.

Tabela 5.48 - Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações

Andar	1000 avaliações		5000 avaliações	
	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
1º	-0,27%	-0,07%	-0,11%	1,02%
2º	-0,09%	-0,53%	0,06%	-0,34%
3º	0,04%	-0,39%	0,18%	-0,19%
4º	0,13%	-0,18%	0,25%	0,01%
5º	0,34%	-0,53%	0,44%	0,27%
6º	0,64%	-1,89%	0,72%	-1,11%
7º	1,50%	-0,37%	1,51%	0,30%
8º	2,02%	1,93%	2,72%	3,32%
9º	2,45%	1,89%	3,26%	2,96%
10º	2,54%	0,18%	3,54%	1,79%

Tabela 5.49 - Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações

Avaliações	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
500	23923	54971	3513818	1,93
1000	24731	42273	3455786	1,88
Incremento	3,38%	-23,10%	-1,65%	-
5000	25506	44653	3571064	1,88
Incremento	6,62%	-18,77%	1,63%	-

Assim como nos demais casos, observa-se na Tabela 5.49, a frequência resultante para o AMS ficou entre 1,88 e 1,93Hz, média das frequências resultantes para o AMS ficou em 1,9Hz, ou seja, coincidente ou muito próxima com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Visando ainda levar em consideração o tempo computacional, na Tabela 5.50, são apresentados os tempos gastos para cada uma das opções de número de avaliações.

Tabela 5.50 - Tempo para otimização algoritmo *Firefly*

Avaliações	Tempo em segundos
500	364
1000	645
5000	2671

Pode-se concluir que a melhor resposta, conforme a maioria dos casos anteriores se dá quando o número de avaliações é 500. Sendo assim, na Figura 6.15 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações referentes ao último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros dos AMSs determinados pelo algoritmo FA, definidos na Tabela 5.43.

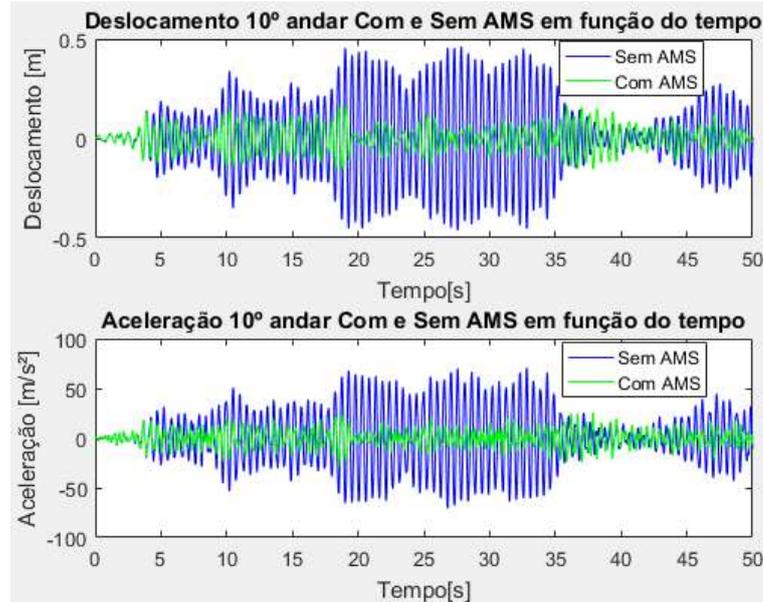


Figura 5.15 - Deslocamentos e acelerações do último andar

Algoritmo *Backtracking Search Optimization* – BSA

Da mesma forma que foi feito com o FA, é feito com o BSA. Na Tabela 5.51 são apresentadas as variações em percentual frente aos deslocamentos e acelerações para os casos de 1000 e 5000 respectivamente, quando comparados aos resultados obtidos através da utilização de 500 avaliações, na qual se verifica que a redução dos deslocamentos e acelerações também não é considerável (média de 0,61% para os deslocamentos e de 0,60% para as acelerações, para 1000 avaliações e de 2,09% para os deslocamentos e de 1,04% para as acelerações, para 5000 avaliações). Os deslocamentos e acelerações reduzem com o aumento do número de avaliações. Assim como o amortecimento aumenta pouco em ambos os incrementos de avaliações. O percentual de rigidez diminui, mas a massa total dos AMS oscila entre aumento e redução neste caso, porém, não são consideráveis as alterações dos parâmetros, frente às reduções dos deslocamentos e das acelerações, conforme se podem verificar na Tabela 5.52.

Tabela 5.51 - Percentual de ganho de redução de deslocamentos e acelerações com 500, 1000 e 5000 avaliações

Andar	1000 avaliações		5000 avaliações	
	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %	Redução Deslocamentos %	Redução Acelerações %
1º	1,06%	2,79%	1,54%	1,27%
2º	1,22%	1,02%	1,56%	1,43%
3º	1,16%	0,96%	1,59%	1,50%
4º	1,08%	0,86%	1,63%	1,54%
5º	0,93%	0,21%	1,69%	0,22%
6º	0,69%	0,22%	1,75%	0,19%
7º	0,12%	0,48%	1,90%	0,40%
8º	-0,17%	-2,22%	2,52%	-0,75%
9º	-0,10%	0,69%	3,40%	2,51%
10º	0,10%	1,03%	3,35%	2,12%

Tabela 5.52 - Percentual de ganho nos parâmetros do AMS com 500, 1000 e 5000 avaliações

Avaliações	Massa [kg]	Amortecimento [Ns/m]	Rigidez [N/m]	Frequência AMS (Hz)
500	25410	46640	3769952	1,94
1000	24700	50486	3483617	1,89
Incremento	-2,79%	8,25%	-7,60%	-
5000	26522	48720	3692432	1,88
Incremento	4,38%	4,46%	-2,06%	-

Observa-se na Tabela 5.52, a frequência resultante para o AMS ficou entre 1,88 e 1,94Hz, média das frequências resultantes para o AMS ficou em 1,9Hz, ou seja, coincidente ou muito próxima com a frequência fundamental da estrutura e da excitação adotada para o sismo.

Visando ainda levar em consideração o tempo computacional, na Tabela 5.53 são apresentados os tempos gastos para cada uma das opções de número de avaliações.

Tabela 5.53 - Tempo para otimização algoritmo BSA

Avaliações	Tempo em segundos
500	281
1000	555
5000	2676

Assim como para o *Firefly*, se pode concluir que a melhor resposta se dá quando o número de avaliações é 500. Sendo assim, na Figura 5.16 são apresentados os gráficos de deslocamentos e acelerações referentes ao último andar da estrutura sem e com AMS, com os parâmetros do AMS determinados pelo algoritmo BSA, definidos na Tabela 5.46.

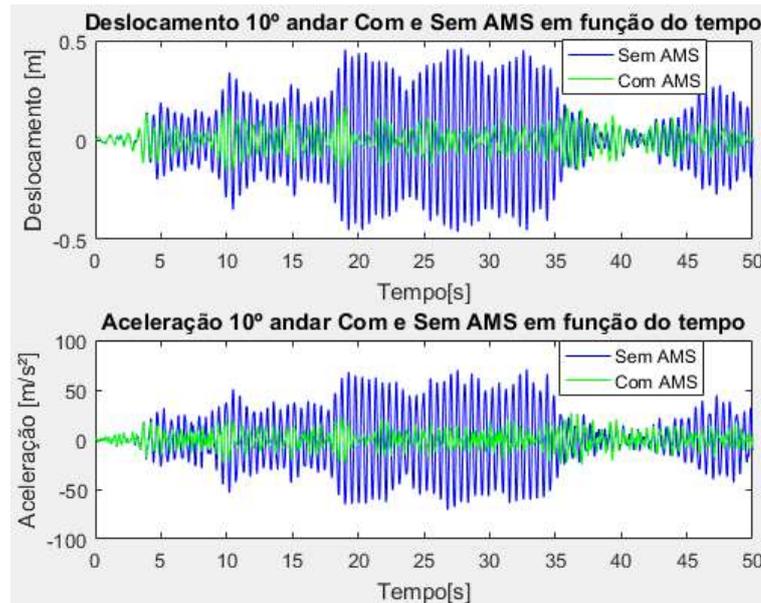


Figura 5.16 - Deslocamentos e acelerações do último andar

5.5 Seleção da Melhor Configuração

Esta etapa se faz necessária quando se tem a realização de um projeto real de engenharia, o qual busca sempre o menor custo com a melhor configuração de projeto, ou seja, melhor custo-benefício.

Desta forma, após a geração e avaliação de diversas configurações para implantação de amortecedores de massa sintonizada na estrutura, com o objetivo de redução das vibrações impostas na estrutura pelo sismo, nesta etapa é feito um comparativo de todas as análises, visando à busca da melhor resposta. A escolha da melhor resposta será realizada através do menor valor em termos de deslocamentos e acelerações do último andar, bem como, a menor massa total do ou dos amortecedores de massa sintonizada. Sendo assim será feito um comparativo do desempenho das opções adotadas, para apontar as vantagens da melhor configuração. Na Tabela 5.54, são apresentadas todas as respostas em termos de deslocamentos, acelerações e massa para as configurações adotadas nos casos da seção 5.4.

Ao avaliar as respostas apresentadas na Tabela 5.54 referentes ao realizado no item 5.4, se pode concluir que a melhor opção em termos de menor massa total para o dispositivo de amortecimento é a opção que contém 1 AMS com 1 variável e pelo método de Villaverde, e a utilização do algoritmo *BSA* (23198kg), mas esta opção não é a ideal, pois apresenta um dos maiores deslocamentos (16,29cm), bem como, a aceleração (2684,01cm/s²) no último andar.

Uma segunda alternativa para uma menor massa total para o dispositivo de amortecimento é a opção que contém 1 AMS com 1 variável e pelo método de Villaverde, e a utilização do algoritmo *Firefly* (23198kg), mas esta opção não é a ideal, pois apresenta o maior deslocamento (21,01cm), bem como, e a maior aceleração (2994,96cm/s²) no último andar.

Levando em consideração o menor deslocamento (15,02cm) no último andar, a opção que melhor representa é a que contém 10 AMS com 30 variáveis de projeto e uma relação direta das variáveis do projeto com os parâmetros do AMS, e massas dos andares diferentes entre elas, juntamente com o algoritmo *Firefly*, sendo esta a melhor opção, pois além do menor deslocamento, também é a opção que fornece a menor aceleração no último andar (2560,74cm/s²), mesmo não tendo uma das menores respostas com relação à massa do AMS (24389kg) em relação ao total da estrutura.

Pode-se ainda considerar mais duas opções de respostas como ótimas as quais também apresentam valores bem próximos ao ideal em termos de deslocamentos e acelerações, porém estas duas opções não são consideradas devido ao valor total da massa dos AMS ser maior que a opção escolhida. As duas opções possíveis são: a primeira é a opção com 1 AMS, 3 variáveis de projeto, relação direta dos parâmetros com as variáveis de projeto, e o algoritmo *Backtracking Search Optimization Algorithm*, a qual apresenta deslocamento e aceleração no último andar respectivamente de 15,73cm e 2621,62cm/s², com massa total de 26763kg; a segunda opção é a com 10 AMS, 30 variáveis de projeto, relação direta dos parâmetros com as variáveis de projeto, e o algoritmo *Backtracking Search Optimization Algorithm*, a qual apresenta deslocamento e aceleração no último andar respectivamente de 15,86cm e 2572,32cm/s², com massa total de 24949kg.

Entre as diversas opções a que melhor se enquadra quanto aos três critérios de seleção é a opção que possui 10 AMS com 30 variáveis de projeto e uma relação direta das variáveis do projeto com os parâmetros do AMS, e massas dos andares diferentes entre elas, juntamente com o algoritmo *Firefly*. Assim a opção selecionada para realizar o amortecimento das vibrações devidas ao sismo neste caso em estudo é apresentada na Tabela 5.55.

Tabela 5.54 - Respostas da estrutura com as diversas configurações da seção 6.4.

1 AMS - 1 variável - Método Villaverde - FA			1 AMS - 1 variável - Método Villaverde - BSA		
Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]	Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]
21,01	2994,96	23198	21,01	2994,96	23198
1 AMS - 3 variáveis - Método Villaverde - FA			1 AMS - 3 variáveis - Método Villaverde BSA		
Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]	Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]
16,28	2684,01	23198	16,29	2697,60	23198
1 AMS - 3 variáveis - relação direta - FA			1 AMS - 3 variáveis - relação direta - BSA		
Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]	Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]
17,00	2647,35	23367	15,73	2621,62	26763
10 AMS - 21 variáveis - relação direta - massas iguais - FA			10 AMS 21 - variáveis - relação direta - massas iguais - BSA		
Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]	Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]
16,65	2749,21	23717	16,61	2730,94	24185
10 AMS - 30 variáveis - relação direta - massas diferentes - FA			10 AMS - 30 variáveis - relação direta - massas diferentes - BSA		
Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]	Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]
15,02	2560,74	24389	15,86	2572,32	24949
6 AMS - 18 variáveis - relação direta - massas diferentes - FA			6 AMS - 18 variáveis - relação direta - massas diferentes - BSA		
Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]	Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]
16,31	2678,74	23923	16,15	2650,41	25410

Tabela 5.55 - Melhor configuração para o dispositivo de amortecimento

10 AMS - 30 variáveis - relação direta - massas diferentes - FA		
Deslocamento [cm]	Aceleração [cm/s ²]	Massa [kg]
15,02	2560,74	24389

5.6 Análise da Melhor Configuração em Relação ao *Drift*

Posteriormente a obtenção da melhor configuração para os AMS, faz-se o fechamento/conclusão das análises e projeto através da verificação desta em relação aos deslocamentos entre andares (*Drift*). Esta verificação é feita com base no que diz a Norma NBR 15421.

Através dos parâmetros estipulados na seção 4.9 de acordo com a NBR15421, a natureza de ocupação da edificação caracteriza-se como categoria 1, sendo fator 1,0, conforme Tabela 3.2. Através da Tabela 4.1, a categoria 1 tem a determinação de ser 0,020 hsx. Sendo a distância entre andares de 3 metros. Desta forma, o valor máximo possível de deslocamento entre andares é de 6cm.

Através da Tabela 5.56, verifica-se que antes da instalação do AMS havia dois andares que não atendem a NBR15421, sendo o oitavo e nono andares, os quais mostram a necessidade de se instalar os dispositivos de amortecimento na estrutura. Após a implantação dos MAMS selecionados, todos os andares atendem o que estipula a Norma, além da redução bastante significativa quanto aos deslocamentos entre andares, sendo em média 64% de redução, conforme pode ser visto na Tabela 5.56.

Tabela 5.56 - *Drift* em cm da melhor configuração.

Andar	Sem AMS	Com AMS	Redução Drift %
1º	3,73	1,24	66,89%
2º	3,65	1,21	66,88%
3º	4,38	1,45	66,88%
4º	4,11	1,36	66,90%
5º	3,76	1,23	67,30%
6º	3,39	1,09	67,91%
7º	5,77	1,91	66,96%
8º	6,59	2,46	62,61%
9º	7,55	3,25	57,04%
10º	4,08	2,17	46,89%

6 CONCLUSÕES

Atualmente já é bem conhecido e consolidado que o uso de dispositivos externos para dissipação de energia é efetivo para reduzir as amplitudes de vibração de sistemas submetidos a cargas dinâmicas. Entretanto, o uso otimizado destes dispositivos ainda é uma área que requer estudos adicionais.

Neste contexto, este trabalho apresentou um método para a otimização de parâmetros de um dos dispositivos de dissipação de energia mais utilizados na prática atualmente, os amortecedores de massa sintonizados. A metodologia proposta foi baseada em dois algoritmos modernos de otimização, o FA e o BSA, os quais são capazes de lidar com problemas complexos de otimização.

Inicialmente foi feita uma verificação dos diversos programas desenvolvidos neste trabalho através de comparação de resultados com outros autores da literatura. Após a verificação das rotinas elaboradas, partiu-se para os exemplos ilustrativos. Neste sentido, cabe ressaltar que a metodologia foi aplicada a um edifício submetido à excitação sísmica, tendo como função objetivo a minimização do deslocamento máximo no topo da edificação; porém, a metodologia proposta é geral e poderia ser aplicada a outro tipo de estrutura submetida a outro carregamento dinâmico tendo outra função objetivo, como por exemplo, uma passarela submetida ao caminhar de pedestres, tendo como função objetivo a minimização da aceleração máxima no centro, por exemplo.

Os resultados das simulações numéricas mostraram a capacidade do método proposto em encontrar os parâmetros ótimos dos MAMS, mesmo quando um grande número de variáveis de projeto estava envolvido, reduzindo consideravelmente os deslocamentos e acelerações máximos dos andares após a implantação do sistema de amortecimento.

Pode-se concluir que o aumento na relação de massas melhora o desempenho do AMS ou dos MAMS, entretanto, não é interessante aumentar a relação de massas visto que isto acarretará em carga adicional à estrutura em análise, podendo tornar inviável a instalação do sistema de controle. Já, para o exemplo ilustrativo em estudo, o número de MAMS, considerando a mesma relação de massas total, não afeta consideravelmente a efetividade dos MAMS, ficando a redução do deslocamento máximo no topo em torno de 67%. O método proposto fornece ao usuário uma série de soluções ótimas ou quase ótimas, permitindo ao projetista a escolha da solução que mais lhe agrada.

Quanto à frequência do AMS ou dos MAMS otimizados, percebe-se que esta sempre resultou próxima à frequência fundamental da estrutura, o que já era esperado, visto que no caso em consideração, a frequência predominante da excitação sísmica estava próxima à frequência do primeiro modo. Porém, deve-se ressaltar que o método proposto tem a capacidade de sintonizar as frequências dos AMSs em diferentes frequências modais, não só na do primeiro modo, pois a metodologia de otimização proposta considera a mitigação da resposta total da estrutura e não apenas a redução da resposta de um modo específico. Ou seja, esta metodologia pode ser aplicada em situações nas quais os modos mais altos tenham um papel importante na resposta total da estrutura.

Quanto à convergência do método, mostrou-se que mesmo aumentando o número de avaliações em 10 vezes (de 500 para 5000), a resposta variou pouco, confirmando a convergência dos dois algoritmos (FA e BSA).

Quanto ao tempo computacional, o algoritmo FA apresentou um tempo superior ao BSA, porém ainda aceitável. De forma geral, pode-se concluir que o método proposto possui um custo computacional satisfatório, ainda mais levando em consideração que se trata de um problema complexo que envolve a otimização de um sistema dinâmico.

Portanto, pode-se concluir que a metodologia proposta pode ser recomendada como uma ferramenta efetiva para projeto ótimo de AMS e MAMS. Neste sentido, a presente dissertação mostrou que é possível projetar AMSs de uma forma segura e econômica.

6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Resolver o problema de otimização dos AMSs no domínio da frequência;

Realizar uma otimização robusta.

Partes do conteúdo desta Dissertação possibilitaram a publicação dos seguintes artigos:

Rossato, L.V., Miguel, L.F.F., Miguel, L.F.F. Controle de vibrações de estruturas através do uso de amortecedor de massa sintonizado (AMS). *XXXVII Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural*, (2016), 1168-1182.

Rossato, L.V., Miguel, L.F.F., Miguel, L.F.F. Estimativa de razão de massas ideal de amortecedor de massa sintonizada para controle de vibrações em estruturas. *Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering - Cilamce*, (2016).

Rossato, L.V., Miguel, L.F.F., Miguel, L.F.F. Optimization of parameters for tuned mass damper. *Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones - ENIEF*, (2016), 1553-1564.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421. Projeto de estruturas resistentes a sismos** – Procedimento, 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações**, 2013.

Bandivadekar T.P., Jangid R. S. Optimization of multiple tuned mass dampers for vibration control of system under external excitation. **Journal of Vibration and Control**, 2013. doi:10.1177/1077546312449849.

Battista, R. C. **Múltiplos Atenuadores Dinâmicos Sincronizados para controle das oscilações induzidas pelo vento na Ponte Rio-Niterói**. II seminário de patologia das edificações. Porto Alegre, Brasil, 2004.

Bekdas, G., Nigdeli, S. M. Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search. **Eng Struct**, vol. 33, p. 2716-23, 2011.

Borges, A.A. **Otimização de forma e paramétrica de estruturas treliçadas através dos métodos meta-heurísticos harmony search e firefly algorithm**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

Cabral, S. V. S. **Uso de Osciladores Passivos Sintonizados no Controle de Vibrações de Estruturas Sujeitas a Excitações Aleatórias**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

Chaves, S. N. P. H. **Atenuação da resposta sísmica de estruturas de edifícios utilizando amortecedores viscosos**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2010.

Chen G., Wu J. Optimal placement of multiple tuned mass dampers for seismic structures. **ASCE Journal of Structural Engineering**, vol. 127(9), p. 1054-1062, 2001.

Civicioglu, P. Backtracking Search Optimization Algorithm for numerical optimization problems. **Applied Mathematics and Computation** 219, p. 8121-8144, 2013.

Davenport A. G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. **Quart J Roy Meteorol Soc London**, vol. 87, p. 194-211, 1961.

EUROCODE 1: **ACTIONS ON STRUCTURES – Part3: Action induced by cranes and machinery**, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, second draft, 2002.

Ferreira, N.A.C. **Efeito do vento em edifícios altos – Aplicação a um caso concreto**. Dissertação de mestrado, Universidade do Porto, Portugal, 2008.

Frahm, H. **Device for damping of bodies**, U.S. Patent No: 989,p. 958, 1911.

Gonçalves, M. S., Lopez, R. H., Miguel, L. F. Fadel. Search group algorithm: A new metaheuristic method for the optimization of truss structures. **Computers and Structures**, vol. 153, p. 165-184, 2015.

Groehs, A. G. **Mecânica Vibratória**. Editora Unisinos, 2001.

Hadi, M. N. S., Arfiadi Y. Optimum design of absorber for MDOF structures. **J Struct Eng (ASCE)**, vol. 124, p. 1272-80, 1998.

Hoang N, Warnitchai P. Design of multiple tuned mass dampers by using a numerical optimizer. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, vol. 34, p. 125-144, 2005.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2372: Mechanical Vibration of machines whith operating speeds from 10 to 200 rev/s - Basis for specifying evaluation standards**, 1974.

Jaan, K. **Numerical Methods in Engineering with MatLab**. Ed. Cambridge, 2005.

Jangid R. S. Optimum multiple tuned mass dampers for base excited undamped systems. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, vol. 28, p. 1041-1049, 1999.

Joshi A. S., Jangid, R. S. Optimum parameters of multiple tuned mass dampers for base-excited damped. **Journal of Sound and Vibration**, vol. 202(5), p. 657-667, 1997.

Kanai, K. An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions. **Bulletin Earthquake Research Institute, University of Tokyo**, vol. 39, p. 85-95, 1961.

Kareem A., Klein, S. Performance of multiple tuned mass dampers under random loadings. **ASCE Journal of Structural Engineering**, vol. 121(2), p. 348-361, 1995.

Lee C. L., Chen Y. T., Chung L. L., Wang, Y. P. Optimal design theories and applications of tuned mass dampers. **Eng Struct**, vol. 28, p. 43-53, 2006.

Li, C. Optimum multi tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, vol. 31, p. 897-898, 2002.

Li, H. N., Ni, X.L. Optimization of non-uniformly distributed multiple tuned mass dampers. **Journal of Sound and Vibration**, vol. 308(3), p. 80-87, 2007.

Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F., Lopez, R. H. Discussion of paper: "Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search. **Engineering Structures**, vol. 54, p. 262-64, 2013.

Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., Miguel, L. F. F., Torii, A. J. A novel approach to the optimum design of MTMDs under seismic excitations. **Structural Control and Health Monitoring**, 2016. DOI 10.1002/stc.1845

Mohebbi, M. et al. Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures. **Journal of Vibration and Control**, 2012. DOI: 10.1177/1077546311434520.

Nagahama, C. V. **Análise Numérica e Modelagem Computacional de um Sistema Estrutural com controle semiativo de vibração tipo amortecedor magnetorreológico**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Juíz de Fora: UFJF/MMC,2013.

Newland, D. E. **An introduction to random vibrations and spectral analysis**. Nova York, Logman, 1987.

Ormondroyd, J., Den Hartog, J. P. The theory of dynamic vibration absorber. **Trans Am Soc Mech Eng**, vol. 928 (50), p. 9-22, 1928.

Ospina, C. S. **Otimização de amortecedores de massa sintonizados, múltiplos e interligados, para o controle de vibrações em edifícios altos**, Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2008.

Paredes, M. M. **Utilização de amortecedores de massas sintonizadas no controle de vibrações em estruturas**. Dissertação, Universidade do Porto, Portugal, 2008

Rao, S. S. **Mechanical Vibrations**. Prentice Hall, 1995.

Rodrigues, R. M. R. **Geração de acelerogramas sísmicos artificiais compatíveis com um espectro de resposta**. Monografia, Escola Politécnica da UFRJ, 2012.

Rossato, L. V., Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. Controle de vibrações de estruturas através do uso de amortecedor de massa sintonizado (AMS). **XXXVII Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural**, p. 1168-1182, 2016.

Rossato, L. V., Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. Estimativa de razão de massas ideal de amortecedor de massa sintonizada para controle de vibrações em estruturas. **Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering-Cilamce**, 2016.

Rossato, L. V., Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. Optimization of parameters for tuned mass damper. **Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones-ENIEF**, p. 1553-1564, 2016.

Sadek, F., Mohraz B., Taylor, A. W., Chung, R. M. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. **Earthq Eng Struct Dyn**, vol. 26, p. 617-35, 1997.

Shinozuka, M., Jan C. M., Digital simulation of random process and its applications. **J. Sound Vib.**, vol. 25, p.111-8, 1972.

Soong T. T., Dargush, G. F. **Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering**, John Wiley & Sons, Chichester, NY, 1997.

Srinivasulu, P., Vaidyanathan, C. V. **Handbook of Machine Foundations**. New Delhi, India, 1976.

Tajimi, H., A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earth-quake. **In Proceedings of 2nd World Conference in Earthquake Engineering**, p. 781-797, 1961.

Villaverde, R., Newmark, N. M. **Seismic Response of Light Attachments to Buildings**. University of Illinois, Urbana, 1980.

Villaverde, R. Reduction in seismic response with heavily-damped vibration absorbers. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester**, Vol. 13, p. 33-42, 1985.

Villaverde, R. Earthquake response of systems with nonproportional damping by the conventional response spectrum method. **Proc. 7th world conference on earthquake engineering. Istanbul**, Vol. 5, p. 467-474, 1980.

Warburton, G. B. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. **Earthquake engineering and structural dynamics**, vol.10, p. 381-401, 1982.

Xu K., Igusa, T. Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**. Vol. 21, p. 1059–1070, 1992.

Yang, X. S. Firefly algorithms for multimodal optimization. **Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009. Lecture Notes in Computer Sciences**, vol. 5792, p. 169-178, 2009.