

Juliano Valdir de Souza

**DETERMINAÇÃO ÓTIMA DO NÚMERO E DOS  
PARÂMETROS DE MÚLTIPLOS ATENUADORES DINÂMICOS  
SINTONIZADOS EM ESTRUTURAS ALTAS SUBMETIDOS À  
AÇÃO DINÂMICA DO VENTO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, para obtenção do Título de Mestre em engenharia Civil.

Orientador: Dr. Eng. Leandro F. Fadel Miguel

Coorientador: Dr. Eng. Rafael Holdorf Lopez

Florianópolis  
2016

Souza, Juliano  
DETERMINAÇÃO ÓTIMA DO NÚMERO E DOS PARÂMETROS DE MÚLTIPLOS  
ATENUADORES DINÂMICOS SINTONIZADOS EM ESTRUTURAS ALTAS  
SUBMETIDOS À AÇÃO DINÂMICA DO VENTO / Juliano Souza ;  
orientador, Leandro Miguel ; coorientador, Rafael Lopez. -  
Florianópolis, SC, 2016.  
116 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Análise dinâmica. 3. Ação dinâmica  
do vento. 4. Controle estrutural - Atenuadores dinâmicos  
sintonizados. 5. Otimização estrutural - BSA, Harmony  
Search. I. Miguel, Leandro. II. Lopez, Rafael. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Juliano Valdir de Souza

**DETERMINAÇÃO ÓTIMA DO NÚMERO E DOS  
PARÂMETROS DE MÚLTIPLOS ATENUADORES DINÂMICOS  
SINTONIZADOS EM ESTRUTURAS ALTAS SUBMETIDOS À  
AÇÃO DINÂMICA DO VENTO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Florianópolis, 2016.

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do PPGEC

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Leandro Fleck Faldel Miguel, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Prof. João Kaminski Jr, Dr  
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

---

Prof. Ivo Jose Padaratz, PhD  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

---

Prof. Otávio Augusto Alves da Silveira, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC



Dedico o trabalho aos meus amigos e às pessoas que me acompanharam durante esta jornada.



Physical laws should have mathematical beauty.  
(Paul Adrien Maurice Dirac)





## RESUMO

Neste trabalho, o enfoque é dado ao dimensionamento de atenuadores dinâmicos sintonizados – ADS. Além de dimensionar as constantes de mola e amortecimento, determinou-se também o número ideal de atenuadores. Controladores estruturais do tipo ADS são vastamente aplicados na engenharia estrutural, com o objetivo de minimizar as oscilações em construções esbeltas sujeitas a ações de natureza dinâmica. O presente trabalho motivou-se principalmente pela carência nos estudos sobre dimensionamento de múltiplos ADS com determinação do número ideal de controladores. Deste modo, são dimensionados múltiplos ADS em uma estrutura alta submetida à ação dinâmica do vento, com base nos estudos conduzidos por Ankireddi e Yang (1996), o qual avalia a influência da massa de ADS simples no controle estrutural de estruturas submetidas à ação dinâmica do vento. Portanto, adaptou-se os algoritmos BSA e *Harmony Search* para que se determine o número ideal de ADS. De fato, o esquema proposto parte de uma configuração universal pré-definida de ADS, descartando-se os ADS desnecessários. Simultaneamente, o algoritmo determina os valores ótimos das constantes de rigidez  $k_d$  e amortecimento  $c_d$ , para cada ADS. A estrutura em estudo possui 400 m de altura e foi submetida à ação do vento sinóptico com flutuação da velocidade do vento na direção longitudinal gerado por intermédio do espectro de potência de Kaimal. Através da análise dinâmica, possibilitou-se comparar a resposta da estrutura com controle de ADS simples e com múltiplos ADS. Posto que, nem sempre utilizar-se múltiplos ADS significa um expressivo ganho no controle estrutural, em relação ao ADS simples, outros fatores são avaliados. O uso de múltiplos ADS possibilita a redução da massa de cada ADS, facilitando a instalação dos mesmos. Além disso, partindo-se da configuração ideal de múltiplos ADS, arguiu-se a hipótese de que um dos controladores estivesse inoperante durante toda a excitação do vento, simulando a falha ou um período de manutenção do equipamento. Assim, constatou-se que múltiplos ADS garantem que a estrutura esteja protegida mesmo quando um dos ADS esteja inoperante.

**Palavras-chave:** ADS. Múltiplos ADS. Controle estrutural. Ação dinâmica do vento. Análise dinâmica. Estruturas altas. Otimização estrutural. Algoritmo *Harmony Search*. Algoritmo BSA.



## ABSTRACT

In this work, the focus is given to the design of tuned mass damper - TMD, and scale the constant spring and damping, also determined the optimal number of attenuators. Structural controllers of TMD type are widely applied in structural engineering, in order to mitigate the fluctuations in slender buildings subject to actions of dynamic source. This work primarily motivated up for the absence in studies of multiple TMD design to determine the optimal number of controllers. Thus, are sized multiple TMD on a tall building subjected to wind dynamic action, based on studies conducted by Ankireddi and Yang (1996), which evaluates the influence of simple TMD on mass structural control structures subjected to wind dynamic action, therefore, it was adapted the BSA and Harmony Search algorithms for determine the ideal number of TMD. In fact, the scheme proposed part of a pre-defined universal configuration TMD, discarding unnecessary TMD. At the same time, the algorithm determines the optimal values of the constants stiffness  $k_d$  and damping  $c_d$  for each TMD. The structure under study has 400 m high and was subjected to the action of the synoptic wind with fluctuating wind speed in the longitudinal direction generated through the Kaimal power spectrum. Through dynamic analysis, it was possible to compare the response of the structure with simple TMD control and multiple TMD. Though not always be used multiple TMD means a significant gain in structural control, compared to the simple TMD, other factors are evaluated. The use of multiple TMD enables the reduction of the mass of each TMD, making it easier to install them. Furthermore, starting from the ideal multiple TMD configuration, the hypothesis is argued, that one of the controllers was dead during the entire wind excitation, simulating an equipment failure or maintenance period. Thus, it was found that multiple TMD ensure that the structure is protected even when one of the TMD is inoperative.

**Keywords:** TMD. Multiple TMD. Structural control. Wind dynamic action. Dynamic analysis. Tall buildings. Structural optimization. Harmony Search Algorithm. BSA Algorithm.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Exemplo de ADS ( <i>Tuned mass damper</i> ).....  | 27 |
| Figura 2 – Taipei 101 e o ADS instalado. ....  | 28 |
| Figura 3 – Furacão Catarina sobre a costa sul do Brasil. ....  | 29 |
| Figura 4 – Tipos de amortecedores .....  | 49 |
| Figura 5 – Exemplo de amortecedor viscoso, atenuador dinâmico<br>sintonizado ADS.....  | 51 |
| Figura 6 – Esquema ilustrando a instalação do ADS no topo da<br>estrutura. ....  | 52 |
| Figura 7 – Ilustração do ADS em forma de pêndulo instalado em Taipei<br>101.....   | 55 |
| Figura 8 – Croqui do pêndulo instalado em Taipei 101. ....   | 55 |
| Figura 9 – Esquema da deformação elástica de uma viga contínua .....   | 40 |
| Figura 10 – Deslocamento transversal e rotação da seção em função do<br>tempo e do comprimento da viga. ....   | 41 |
| Figura 11 – Esquema da interferência da rugosidade do solo sobre a<br>velocidade do vento.....   | 58 |
| Figura 12 – Perfis de velocidade média dentro da camada limite<br>atmosférica de diferentes terrenos. ....   | 60 |
| Figura 13– Componentes da velocidade do vento.....   | 61 |
| Figura 14 – Flutuação do vento .....   | 62 |
| Figura 15 – Curva de correlação .....  | 64 |
| Figura 16 – Dados experimentais da correlação vertical.....  | 65 |
| Figura 17 – Dados experimentais da correlação horizontal .....   | 66 |
| Figura 18 – Mínimo local e global. ....  | 68 |
| Figura 19 – Fluxograma do algoritmo <i>Harmony Search</i> – HS.....  | 71 |
| Figura 20 – Recombinação genética .....  | 72 |
| Figura 21 – Velocidade turbulenta no topo da estrutura. ....   | 73 |
| Figura 22 – Modelo com grau de liberdade e ADS instalado. ....   | 76 |
| Figura 23 – Estrutura em estudo.....   | 82 |
| Figura 24 – Discretização da massa da estrutura em análise.....  | 83 |
| Figura 25 – Perfil velocidade média do vento.....  | 84 |
| Figura 26 – Resposta da estrutura sem controle. ....   | 85 |
| Figura 27 – Gráfico dos resultados de cada ADS simples -<br>dimensionamento analítico. ....  | 86 |
| Figura 28 – Gráfico dos resultados para cada massa do ADS simples<br>com otimização via algoritmo <i>Harmony Search</i> . ....   | 88 |
| Figura 29 – Comparação entre os resultados do dimensionamento<br>numérico para ADS simples com algoritmo <i>Harmony Search</i> e o<br>dimensionamento analítico para ADS simples. .... | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 30 – Gráfico dos resultados para cada massa do ADS simples otimizando com o algoritmo BSA.....  | 90  |
| Figura 31 – Gráfico comparativo entre os resultados do ADS simples com dimensionamento analítico e os resultados do ADS simples otimizados com o BSA.....  | 91  |
| Figura 32 – Gráfico com os resultados do dimensionamento de ADS simples analítico, com resultados do ADS simples otimizado com BSA e os resultados do ADS simples otimizado com <i>Harmony Search</i> .....  | 91  |
| Figura 33 – Gráfico da resposta otimizada com <i>Harmony Search</i> para múltiplos ADS.....  | 93  |
| Figura 34 – Gráfico comparativo entre os resultados de ADS simples dimensionado analiticamente com os resultados de múltiplos ADS otimizados com o <i>Harmony Search</i> . ....  | 94  |
| Figura 35 – Gráfico comparativo entre os resultados do ADS simples com dimensionamento analítico, resultados do ADS simples com dimensionamento numérico com <i>Harmony Search</i> e os resultados de múltiplos ADS otimizados com <i>Harmony Search</i> .....             | 95  |
| Figura 36 – Gráfico da resposta otimizada com BSA para múltiplos ADS.....  | 96  |
| Figura 37 – Gráfico comparativo entre os resultados de ADS simples dimensionado analiticamente e os resultados de múltiplos ADS otimizados via BSA.....  | 96  |
| Figura 38 – Gráfico comparativo entre os resultados de ADS simples com dimensionamento analítico, resultados de ADS simples com dimensionamento numérico via BSA e os resultados de múltiplos ADS otimizados via BSA.....  | 97  |
| Figura 39 – Gráfico comparativo entre os resultados do dimensionamento analítico de ADS simples, resultados do dimensionamento de múltiplo ADS via BSA e os resultados de múltiplos ADS otimizados via <i>Harmony Search</i> . ....  | 98  |
| Figura 40 – Gráfico comparativo entre os resultados de ADS simples com dimensionamento analítico, resultados de ADS simples com dimensionamento numérico via BSA e <i>Harmony Search</i> e os resultados de múltiplos ADS otimizados via BSA e <i>Harmony Search</i> ..... | 99  |
| Figura 41 – Resposta dos deslocamentos no topo da estrutura ao longo do tempo, com ADS simples dimensionado analiticamente. ....   | 101 |
| Figura 42 – Deslocamentos medidos no topo da estrutura com ADS simples dimensionado analiticamente sobreposto com a resposta sem ADS. ....   | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 43 – Gráfico da resposta dos deslocamentos medidos no topo da estrutura com ADS simples calculado numericamente via algoritmo <i>Harmony Search</i> . .....                               | 103 |
| Figura 44 – Gráficos sobrepostos da estrutura com ADS simples dimensionados numericamente com <i>Harmony Search</i> e sem controle. ....   | 104 |
| Figura 45 – Gráfico dos deslocamentos medidos no topo da estrutura com três ADS instalados, múltiplos ADS dimensionados numericamente via <i>Harmony Search</i> . ....                           | 107 |
| Figura 46 – Sobreposição das respostas sem controle e com três ADS instalados. ....  | 107 |
| Figura 47 – Sobreposição da resposta sem controle, com ADS simples dimensionado analiticamente e com três ADS dimensionados numericamente via <i>Harmony Search</i> . ....                       | 108 |
| Figura 48 – Gráfico da resposta da estrutura com controle de múltiplos ADS considerando um dos ADS inoperante. ....  | 110 |
| Figura 49 – Sobreposição da resposta da estrutura com controle de múltiplos ADS considerando um dos ADS inoperante com a resposta sem controle. ....   | 111 |
| Figura 50 – Sobreposição da resposta da estrutura com controle de múltiplos ADS considerando um dos ADS inoperante com a resposta da estrutura com controle utilizando todos os ADS ativos. .... | 111 |





## LISTA DE QUADROS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 – Utilizações de controladores estruturais em obras civis. ....   | 54  |
| Tabela 2 – Valores para o comprimento de rugosidade .....  | 59  |
| Tabela 3 – As cinco frequências naturais mais baixas da estrutura.....   | 83  |
| Tabela 4 – Quantidade ideal de ADS para cada massa utilizada no conjunto .....   | 99  |
| Tabela 5 – Desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura para ADS simples e múltiplos ADS, testados para variação da massa de 1% até 9%, para cada método de dimensionamento..... | 100 |
| Tabela 6 – Resultados da análise da estrutura sem ADS e com ADS simples calculado analiticamente. ....   | 102 |
| Tabela 7 – Resultados da análise da estrutura sem controle, com ADS simples calculado via método analítico e ADS simples calculado numericamente via <i>Harmony Search</i> .....                 | 104 |
| Tabela 8 – Parâmetro dos múltiplos ADS dimensionados .....   | 106 |
| Tabela 9 – Frequência individual dos três ADS instalados na estrutura. ....  | 106 |
| Tabela 10 – Respostas da estrutura sem controle, com ADS simples calculado via método analítico e ADS simples calculado numericamente com <i>Harmony Search</i> .....                            | 109 |
| Tabela 11 – Conjunto de ADS utilizado no controle estrutural considerando um ADS inoperante. ....  | 110 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADS – Atenuadores dinâmicos sintonizados  
AMD – Amortecedor de massa ativa  
BSA – *Backtracking Search Algorithm*  
EPS – *Extratropical pressure systems*  
GA – Algoritmo Genético  
HMCR – *Harmony memory considering rate*  
HMS – *Harmony memory size*  
HS – *Harmony Search*  
MEF – Método dos elementos finitos  
NI – Número de iterações  
PAR – *Pitch adjusting rate*  
RMS – *Root mean square*  
SA – *Simulated Annealing*  
TMD – *Tuned mass damper*  
TS – *Thunder storm*



## LISTA DE SÍMBOLOS

|                                |                                     |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| $m_r$                          | Massa do elemento $r$               |
| $x, y, z$                      | Deslocamento na direção indicada    |
| $\delta x, \delta y, \delta z$ | Deslocamento infinitesimal          |
| $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$    | Velocidade na direção indicada      |
| $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ | Aceleração na direção indicada      |
| $F^r$                          | Força aplicada no elemento $r$      |
| $T$                            | Energia cinética                    |
| $t_0, t_1$                     | Intervalo de tempo                  |
| $A_r$                          | Funcional Ação                      |
| $V$                            | Energia potencial                   |
| $L$                            | função Lagrangiana                  |
| $\delta L$                     | Variação da função Lagrangiana      |
| $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$    | Coordenadas generalizadas           |
| $\hat{Q}_r$                    | Energia dissipativa do elemento $r$ |
| $\delta A_r$                   | Variação do funcional Ação          |
| $c$                            | Coefficiente de amortecimento       |
| $C$                            | Matriz de amortecimento             |
| $\vec{x}$                      | Vetor deslocamento                  |
| $\vec{\dot{x}}$                | Vetor velocidade                    |
| $\vec{\ddot{x}}$               | Vetor aceleração                    |
| $\hat{K}$                      | Matriz de constantes                |
| $\omega_n$                     | Frequência natural do sistema       |
| $\phi_n$                       | Constante de fase                   |
| $D$                            | Matriz dinâmica                     |
| $\Phi$                         | Matriz modal                        |
| $\alpha, \eta$                 | Parâmetros de ajuste de Newmark     |
| <b>LDL</b>                     | Eliminação de Gauss                 |
| $\bar{V}$                      | Velocidade média                    |
| $v$                            | Velocidade parcial da turbulência   |
| $u_0^*$                        | Velocidade de fricção               |
| $k$                            | Constante de Karman                 |
| $z$                            | Altura de referência                |
| $z_0$                          | Rugosidade do terreno               |
| $i, j, k$                      | Direções ortogonais                 |
| $T_0$                          | Período de aplicação                |
| $\sigma_u(z)$                  | Desvio padrão                       |
| $I_u$                          | Intensidade da turbulência          |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $Y_1$                 | Equação intermediária                      |
| $S_1(f)$              | Densidade espectral                        |
| $f$                   | Frequência do vento                        |
| $\emptyset_j$         | Ângulo de fase                             |
| $R_i$                 | Comprimento de correlação                  |
| $\tau$                | Variação temporal da velocidade            |
| $T_v$                 | Período médio dos turbilhões               |
| $L_v^x, L_v^y, L_v^z$ | Comprimento de correlação em suas direções |
| $S$                   | Domínio de busca                           |
| $x$                   | Incógnita da otimização                    |
| $k_d$                 | Rigidez do ADS                             |
| $m_d$                 | Massa do ADS                               |
| $c_d$                 | Amortecimento do ADS                       |
| $f(x)$                | Função objetiva                            |
| $\Re$                 | Conjunto de números reais                  |
| $\mathbb{Z}$          | Conjunto de números inteiros               |
| <b>G1, G2, G3, G4</b> | Restrições do problema                     |
| $w$                   | Peso específico                            |
| $\mu$                 | Razão da massa do ADS                      |
| $\xi_{\text{aopt}}$   | Razão de amortecimento ótima               |
| $\delta_{\text{opt}}$ | Decremento logarítmico ótimo da amplitude  |
| $m_b$                 | Primeiro argumento da matriz de massa      |
| $u$                   | Deslocamento da estrutura                  |
| $\rho_{ar}$           | Densidade do ar                            |
| $C_p$                 | Coefficiente de escoamento                 |
| $\vec{F}_d$           | Força de arrasto do vento                  |
| $A_d$                 | Área de influência                         |
| $b_o, b_1$            | Parâmetros do Método de Rayleigh           |
| $M_\Phi$              | Matriz de massa modal                      |
| $C_\Phi$              | Matriz de amortecimento modal              |
| $K_\Phi$              | Matriz de rigidez modal                    |

## SUMÁRIO

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>25</b> |
| 1.1.      | OBJETIVOS.....   | 30        |
| 1.2.      | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....  | 31        |
| <b>2.</b> | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>  | <b>33</b> |
| <b>3.</b> | <b>CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....</b>   | <b>38</b> |
| 3.1.      | CONTROLE ESTRUTURAL.....   | 49        |
| 3.1.1.    | Sistema de controle de estruturas .....  | 50        |
| 3.1.2.    | Exemplos de aplicação na engenharia .....                                      | 53        |
| 3.2.      | DINÂMICA DAS ESTRUTURAS .....  | 38        |
| 3.2.1.    | Princípio de Hamilton .....  | 38        |
| 3.2.1.1.  | Princípio de Hamilton aplicado a sistemas contínuos –<br>vibrações livres..... | 40        |
| 3.2.1.2.  | Vibrações livres segundo MEF e princípio de Hamilton                           | 42        |
| 3.2.1.3.  | Análise modal.....   | 44        |
| 3.2.2.    | Integração numérica .....  | 46        |
| 3.2.2.1.  | Integração de Newmark .....  | Erro!     |
|           | Indicador não definido.  |           |
| 3.3.      | FORÇA DO VENTO EM ESTRUTURAS.....  | 56        |
| 3.3.1.    | Ciclones extratropicais – Tormentas EPS .....                                  | 56        |
| 3.3.1.1.  | Perfil velocidade média .....  | 57        |
| 3.3.1.2.  | Turbulência do vento.....  | 60        |
| 3.3.1.3.  | Espectro de potência do vento .....  | 63        |
| 3.3.1.4.  | Correlação espacial.....   | 64        |
| 3.4.      | OTIMIZAÇÃO EM ENGENHARIA.....  | 67        |
| 3.4.1.    | Conceitos de otimização .....  | 67        |
| 3.4.2.    | Algoritmos Heurísticos.....  | 69        |
| <b>4.</b> | <b>FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....</b>   | <b>73</b> |
| 4.1.      | METODOLOGIA PROPOSTA .....   | 76        |
| 4.1.1.    | Dimensionamento de ADS simples.....  | 76        |
| 4.1.2.    | Dimensionamento de múltiplos ADS .....   | 79        |
| 4.2.      | ESTUDO DE CASO .....   | 82        |
| 4.2.1.    | Estrutura em análise .....   | 82        |
| 4.2.2.    | Cálculo da resposta sem controle.....  | 85        |
| 4.2.3.    | Análise da resposta com ADS simples – dimensionamento<br>analítico .....       | 86        |
| 4.2.4.    | Análise da resposta com ADS simples – dimensionamento<br>numérico.....         | 87        |
| 4.2.5.    | Análise da resposta com múltiplos ADS – dimensionamento<br>numérico.....       | 92        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4.2.6. Resposta ótima da estrutura com ADS simples.....</b>                               | <b>101</b> |
| <b>4.2.7. Resposta ótima da estrutura com múltiplos ADS.....</b>                             | <b>105</b> |
| <b>4.2.8. Resposta da estrutura com múltiplos ADS – considerando um ADS inoperante. ....</b> | <b>109</b> |
| <b>5. CONCLUSÃO .....</b>  | <b>113</b> |
| <b>5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>  | <b>116</b> |



## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional do centro de grandes cidades e o elevado custo dos terrenos tem ocasionado uma verticalização acentuada das construções; edifícios com altura na ordem de 200 m têm se tornado cada vez mais frequentes, mesmo no Brasil. Cidades como Balneário Camboriú, na costa catarinense, vêm construindo edifícios cada vez mais altos e mais esbeltos. Fora do país, por exemplo, alguns “arranha-céus” concluídos nas últimas décadas chegam a ultrapassar 400 m. Dentre estes, pode-se mencionar o Burj Al Arab em Dubai com 828 m de altura, Taipei 101, em Taipei, com 508 m de altura, o Shanghai World Financial Center, em Xangai, com 492 m de altura, para citar alguns.

Cabe salientar que a construção dessas estruturas só foi possível graças ao avanço tecnológico, como, por exemplo, concretos especiais de alta resistência e utilização de vigas e lajes protendidas; ambos permitem construções com vãos cada vez maiores e estruturas cada vez mais altas. Com isso, as estruturas tornam-se mais esbeltas e, assim, suscetíveis a vibrações, que, acima de um determinado nível, podem causar desconforto aos usuários e acarretar danos estruturais. Portanto, faz-se uso de artifícios que reduzam as oscilações estruturais excessivas (MIGUEL, 2002).

Na engenharia civil, as cargas externas são consideradas estacionárias, em sua maioria. No entanto, existem algumas ações que podem variar ao longo do tempo, o vento é um exemplo, do qual sua velocidade possui uma flutuação entorno de uma velocidade média. Assim como o vento, existem outras ações com características dinâmicas, a ação de sismos, efeito de marés, são alguns exemplos. Estas ações podem acarretar oscilações excessivas ou até a ruína da estrutura, quando a mesma não estiver preparada para resistir estes carregamentos.

Técnicas de controle de oscilações são utilizadas com o objetivo de reduzir ou neutralizar oscilações excessivas provenientes de ações de natureza dinâmica. Na engenharia civil tais solicitações podem ser oriundas da ação de vento, sismos, ondas oceânicas, impacto de aviões, explosões, entre outros; essas ações podem acarretar oscilações na estrutura acima de níveis admissíveis, originando danos estruturais ou desconforto na utilização. Assim, justifica-se a utilização de dispositivos de controle que sejam capazes de minimizar esses efeitos.

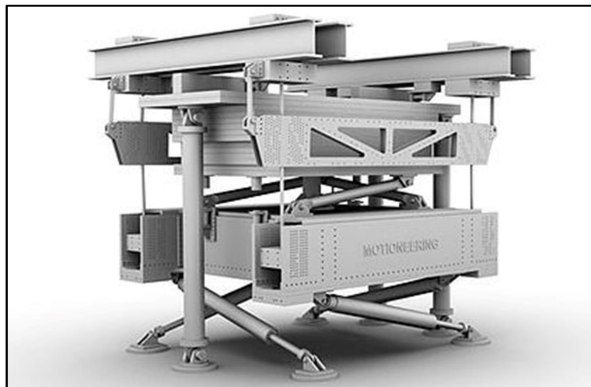
Oscilações de estruturas altas e esbeltas podem ser atenuadas através de amortecedores mecânicos, projetados para que parte da

energia mecânica do movimento da estrutura seja dissipada, comumente na forma de calor, resultando em uma redução da amplitude do movimento oscilatório (MAHMOODI, 1969). A utilização de amortecedor também pode ser utilizada em outras estruturas, como pontes, torres de transmissão, ginásios de esportes, fábricas, entre outros (MIGUEL, 2002).

De acordo com Nemir et al. (1994) os amortecedores podem ser classificados em amortecedores ativos, passivos e semiativos. Amortecedores ativos (*Active mass damper* – AMD) trabalham com retroalimentação, necessitando informações sobre o comportamento da estrutura e de energia externa para o funcionamento. Devido a isso, possuem normalmente um custo mais elevado que o amortecedor passivo. Entretanto, possuem uma maior eficiência na atenuação dos efeitos dinâmicos. Os atenuadores semiativos necessitam de informações específicas do comportamento da estrutura, porém não necessitam, usualmente, de energia externa para seu funcionamento (MIGUEL, 2002).

Entre os amortecedores passivos, um dos mais empregados, por sua simplicidade de instalação e manutenção, tanto em construções novas como em estruturas em uso, é o atenuador dinâmico sintonizado (ADS) ou *Tuned mass damper* (TMD). O ADS é composto por uma massa capaz de mobilizar energia cinética suficiente para contrabalançar a oscilação da estrutura, por um dispositivo capaz de estocar energia potencial, mola do sistema, e um dispositivo capaz de dissipar energia, geralmente um amortecedor. Por ser um mecanismo simples, é comumente utilizado em edifícios sujeitos às ações de natureza dinâmica. Estes equipamentos vêm sendo amplamente empregados em edifícios altos, como por exemplo, o Citigroup Center em Nova Iorque, o Yokohama Landmark Tower em Yokohama, o Burj Al Arab em Dubai, o Trump Tower em Nova Iorque e o Taipei 101 em Taiwan. Um exemplo de ADS pode ser visto na Figura 1:

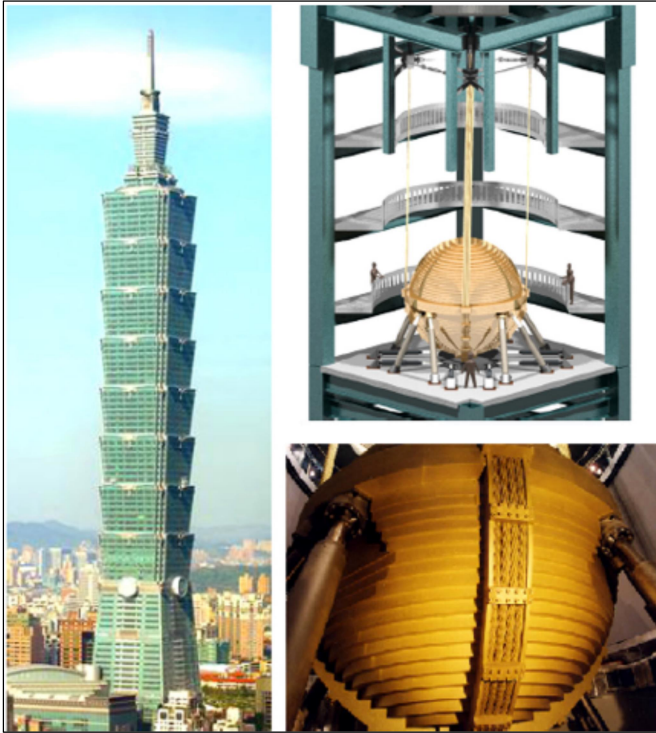
Figura 1 – Exemplo de ADS (*Tuned mass damper*)



Fonte: RWDI (2016)

Em alguns casos, torna-se indispensável a utilização de mecanismos de controle, tanto do ponto de vista de segurança como sob o enfoque de conforto dos usuários. Taiwan, por exemplo, está localizada em uma região sismicamente ativa e propensa a sofrer ataques frequentes de fortes tufões. Nesse caso, com condições tão adversas, a construção de Taipei 101 (509 m) poderia tornar-se inviável sem a presença de algum equipamento adicional de controle estrutural (BEKDAS E NIGDELI, 2011). Taipei 101 tem como um dos seus mecanismos de controle estrutural a utilização de ADS, um pêndulo no centro de sua porção superior, responsável por reduzir parte da oscilação da estrutura. Na Figura 2, o ADS do edifício Taipei 101 pode ser observado.

Figura 2 – Taipei 101 e o ADS instalado.

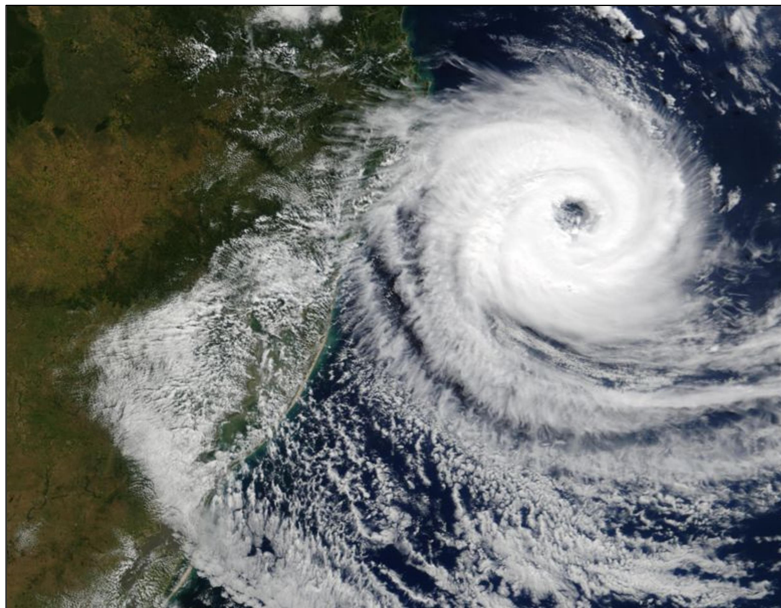


Fonte: RWDI (apud BEDKAS, NIGDELI, 2011)

Na região centro sul do Brasil é onde estão registradas as maiores velocidades características do vento, podendo atingir velocidades de 45,8 m/s ou 165 km/h na cidade de Florianópolis (BECK *et al.* 2013), registrada na base de dados de Padaratz (1977), da qual originou a NBR 6123.

Diversos acidentes gerados pelo vento têm sido registrados no Brasil, com estruturas sendo levadas ao colapso (BLESSMANN, 1995). Mais recentemente, pode-se destacar a incidência do furacão Catarina na costa brasileira, em 2004. Este evento deixou 3 mortes, 75 feridos, 1500 famílias desabrigadas e um prejuízo econômico estimado em 400 milhões de dólares. Na Figura 3, pode-se ver uma imagem de satélite do furacão Catarina de 2004.

Figura 3 – Furacão Catarina sobre a costa sul do Brasil.



Fonte: Frantz; Mags (2014).

Mesmo que a região de Santa Catarina seja alvo de intensos eventos meteorológicos, a construção de estruturas altas e esbeltas torna-se possível, desde que técnicas adequadas sejam aplicadas a fim de minimizar o efeito dinâmico causado pelo vento. A bibliografia expõe diversos métodos capazes de diminuir o efeito dinâmico do vento sobre a estrutura, dentre os quais se destaca o mecanismo de controle estrutural chamado ADS (atenuador dinâmico sintonizado).

Normalmente, quanto maior a massa presente no ADS, maior será sua eficiência. Entretanto, por razões construtivas, ela é normalmente fixada em um valor máximo, comumente em função da massa da estrutura a ser controlada. Dessa forma, determinam-se os valores das constantes de rigidez e amortecimento capazes de dissipar a maior quantidade de energia de oscilação, por meio de métodos clássicos como os apresentados por Den Hartog (1956) e Warburton (1982). Cabe

destacar que esses são métodos analíticos, determinados para sistemas de IGD submetidos a excitações harmônicas ou ruído branco.

Especialmente a partir dos últimos 15 anos, tem-se dado ênfase nos estudos sobre a determinação de parâmetros ótimos de ADS sob ações aleatórias. O dimensionamento de ADS tem o objetivo de determinar as propriedades do mesmo, dimensionar a mola e o amortecedor do dispositivo de controle, a fim de que se obtenha o melhor desempenho, ou seja, maior controle na amplificação dinâmica da estrutura. Recentemente, trabalhos como Hadi e Arfiadi (2011), Mohebbi et al (2012), Zhan et al (2013), entre outros, estudam a resposta da estrutura ao instalar-se múltiplos ADS na mesma. A fim de comparar a eficiência de múltiplos ADS e ADS simples no controle estrutural, a massa total utilizada em ambos não pode ser diferente, ou seja, mesmo que se utilizem múltiplos ADS o somatório da massa do conjunto de ADS não deve ser superior a massa utilizada no ADS simples. Tendo em vista que, quanto maior a massa do conjunto de ADS, maior tende a ser sua eficiência. Na bibliografia não há uma metodologia em que se determina numericamente a quantidade ideal de ADS; fica ao encargo da experiência do projetista determinar o número de ADS a ser instalado na estrutura.

Nesse contexto, o presente trabalho expõe uma forma de otimizar não apenas os parâmetros mola e amortecedor dos múltiplos ADS, como também determinar a quantidade ótima de dispositivos necessários para o controle, em vibrações de estruturas altas submetidas à ação dinâmica do vento. Neste caso, o número de ADS integra-se às variáveis do problema de otimização e cada ADS possuirá uma mola e um amortecedor, que serão dimensionados para cada ADS.

## 1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral dimensionar múltiplos atenuadores dinâmicos sintonizados – ADS, além de determinar o número ótimo de ADS necessário para controlar as oscilações excessivas da estrutura.

De modo mais específico, a utilização de múltiplos ADS possibilita que a estrutura possua mais de um ADS atrelado à mesma, diminuindo a massa de cada mecanismo de controle e mantendo-a protegida mesmo quando um dos dispositivos estiver inoperante. A estrutura de estudo possui elevada altura e grande esbeltez, tornando-se suscetível à ação dinâmica do vento. Em função de sua característica,

trata-se de um problema de otimização multimodal e não convexo, tornando indispensável o uso de algoritmos de otimização heurísticos. Tendo em vista que o número ótimo de ADS é uma variável discreta, enquanto os parâmetros de rigidez e amortecimento de cada oscilador são variáveis contínuas, tornando-se um problema com variáveis mistas. Dessa forma, serão empregados dois algoritmos metaheurísticos (BSA e *Harmony Search Algorithm*), que são capazes de lidar com essas dificuldades.

Os objetivos específicos são elencados:

- Estudar a influência da variação da massa do ADS simples no controle da oscilação da estrutura, utilizando as equações de Warburton (1982) para dimensionar ADS simples.
- Estudar a influência da variação da massa do ADS simples no controle da oscilação da estrutura, utilizando dimensionamento numérico de ADS, com algoritmo de otimização BSA e *Harmony Search*.
- Introduzir o número de ADS nas variáveis de busca dos algoritmos de otimização BSA e *Harmony Search*, a fim de analisar a influência da variação da massa de múltiplos ADS no controle da estrutura de estudo.
- Avaliar o desempenho do ADS simples, com dimensionamento analítico e numérico, comparando com os resultados do controle estrutural obtidos através da instalação de múltiplos ADS, dimensionados via método numérico *Harmony Search*.
- Analisar o desempenho de múltiplos ADS quando um dos mecanismos de controle apresenta falha, considerando-o inoperante durante a aplicação do sinal.

## 1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho segue a seguinte organização:

Capítulo 1: destina-se à introdução do tema.

Capítulo 2: exibe a revisão de literatura do tema, estudos realizados nos últimos anos.

Capítulo 3: exibe conceitos sobre controladores dinâmicos estruturais, dinâmica das estruturas, otimização em estruturas e geração estocástica do vento.

Capítulo 4: apresentação da metodologia proposta, utilizando os conceitos do capítulo anterior formulou-se uma metodologia para o

dimensionamento de ADS simples e múltiplos; ao final apresenta a aplicação dessa metodologia em um exemplo.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Controle de vibrações em estruturas submetidas a ações dinâmicas tem recebido atenção da literatura nas últimas décadas. Alguns trabalhos foram propostos visando a otimização de mecanismos de controle estrutural. Especial ênfase foi dada à otimização de ADS simples, submetidos a excitações sísmicas e tormentas de vento.

Suhardjo, Spencer e Kareem (1992) estudaram a eficiência de controladores ativos e controladores passivos em estruturas altas submetidas à ação do vento turbulento. O trabalho teve como objetivo dimensionar controladores que reduzissem a aceleração dos pavimentos da estrutura, de acordo com a norma  $H_2$ . A estrutura de análise foi idealizada com 60 pavimentos, com uma altura de 183 m, a ação do vento foi aplicada em três pontos equidistantes verticalmente. Diante desse problema, os controladores ativos apresentaram um desempenho pouco melhor que os controladores passivos. Entretanto, ambos os tipos de controladores possuíam grande capacidade no controle da aceleração dos pavimentos da edificação, quando a estrutura foi submetida à ação do vento.

Ankireddi e Yang (1996) compararam a eficiência dos controladores ativos (AMD) e passivos (ADS) instalados sobre estruturas altas sujeitas à ação do vento. As expressões utilizadas para o dimensionamento do ADS foram propostas com base em modelos de apenas um grau de liberdade e excitação do tipo ruído branco (*white noise*), a partir da formulação de Warburton (1982). O estudo estendeu-se também na interferência da variação da massa dos controladores sobre o controle dinâmico. Ao final, os resultados mostraram a eficiência do dispositivo AMD sobre o dispositivo ADS, ressaltando que os dispositivos AMD possuem maior custo em relação aos dispositivos ADS.

Com o intuito de aumentar a eficiência do controle, estudos visando a instalação de múltiplos ADS passaram a ser conduzidos. Em 2003 Chen e Wu (2003), utilizaram múltiplos ADS em uma estrutura de três pavimentos, onde o parâmetro de amortecimento foi determinado utilizando mesa vibratória, com vibração livre e um modelo reduzido da estrutura. Os ADS foram instalados no piso dos pavimentos com base no método sequencial desenvolvido pelo próprio autor. Em seguida o modelo foi submetido à excitação do tipo ruído branco e dois sinais distintos de sismos, com o intuito de avaliar a eficiência dos múltiplos ADS. Os resultados experimentais mostraram que o sistema de múltiplos ADS é substancialmente superior ao controle com ADS

simples. Os autores também concluíram que os resultados avaliados na mesa vibratória e numericamente são equivalentes. Quando a estrutura foi submetida à excitação do tipo ruído branco, obteve controle dinâmico de 62%, tanto para ADS simples e para múltiplos ADS.

Kim et al (2004) propuseram um mecanismo de controle com base em amortecedores ativos com sistema deslizante difuso, a fim de minimizar as ações dinâmicas do vento de uma estrutura de 76 pavimentos, com mais de 306 m de altura, um estudo realizado sobre o trabalho de Yang et al (1998), o mecanismo possibilita lidar com a não-linearidade do problema dinâmico. O modelo proporcionou redução de 51% em relação ao RMS (*root mean square*) dos deslocamentos no topo da estrutura.

Zhu e Dong (2004) aplicam atenuadores dinâmicos semiativos em uma estrutura de 40 pavimentos submetida à excitação dinâmica do vento, propondo um método chamado de MR/ER, o amortecedor possui uma parcela de atenuação proveniente das forças ativas e outra proveniente das forças passivas, onde a força passiva é combinada com as forças de amortecimento da estrutura. Os autores compararam o método MR/ER com o modelo estratégico chamado *linear quadratic Gaussian* (LQG), ao final o modelo MR/ER mostrou-se superior ao LQG, em relação à redução da aceleração e dos deslocamentos da estrutura em estudo.

Hoang e Warnitchai (2005) propuseram a utilização da equação de *Lyapunov* para reduzir os graus de liberdade do equacionamento que dimensiona múltiplos ADS, tornando-a uma função gradiente com apenas um grau de liberdade. Desta forma, possibilitando minimizar vibrações excessivas de estruturas lineares submetidas à excitação do tipo banda larga (*wide-band*). Após determinar a configuração ótima de ADS para uma estrutura com um grau de liberdade, o autor afirma que a utilização de múltiplos ADS aumenta a robustez do modelo, tornando-o menos suscetível a incertezas dos parâmetros do sistema.

Uma nova metodologia, chamada SAIVS-TMD, é proposta por Varadarajan e Nagarajaiah (2005), a metodologia baseia-se em amortecedores semiativos. A utilização foi comparada com controladores ADS simples e controladores ativos, os controladores foram aplicados em uma estrutura de 306 m de altura submetida à ação dinâmica do vento, os estudos foram feitos sobre uma estrutura real construída em Melbourne na Austrália. O controlador proposto tem a finalidade de modular sua frequência durante a ação do vento. O modelo SAIVS-TMD reduziu substancialmente a resposta da estrutura, em relação à estrutura sem controle e a utilização de ADS simples. O

SAIVS-TMD mostrou que possui um poder de controle estrutural igual à utilização de atenuador ativo, entretanto, consumindo menos energia. A estrutura também foi analisada com redução de 615% na rigidez da estrutura, e o modelo mostrou-se robusto no controle dos deslocamentos mesmo sob estas circunstâncias.

Bashor et al (2005) realizaram estudos sobre os níveis aceitáveis de aceleração nos pavimentos de uma estrutura, de forma que não comprometa o conforto da utilização daquelas. Neste trabalho, considerou-se a incerteza no amortecimento estrutural. De acordo com o estudo, constatou-se que edifícios altos tendem a falhar nos estados limites de serviço, com probabilidade de 40%, quando submetidos à ação dinâmica do vento. Como a aceleração proveniente da excitação torna-se perceptível, a utilização de controladores dinâmicos é uma alternativa interessante, visto que o mesmo tem a capacidade de dissipar uma parcela da energia de oscilação, não extrapolando os limites aceitáveis da aceleração estrutural.

Liu et al (2006) utilizaram-se de ADS para controlar a resposta de edifícios altos sujeitos à ação dinâmica do vento. O estudo considerou a interação da estrutura com três tipos de solos diferentes, com densidade baixa, moderada e elevada, com o objetivo de analisar o efeito do solo no dimensionamento do ADS, a estrutura de análise continha 160 m de altura e foi submetida à ação do vento turbulento. A utilização de ADS mostrou-se eficiente também para este tipo de problema.

Karna (2009) estudou a aplicação de ADS em mastros estaiados e chaminés, esses submetidos à ação do vento. O trabalho apresentou exemplos práticos de dimensionamento de ADS, forma como são utilizados e dimensionados. O dimensionamento estudado por Karna (2009) utiliza valores adimensionais para os parâmetros do ADS, chamado de número de *Scruton*, o autor relatou que o mecanismo tem ganhado grande aplicação nas chaminés e torres estaiadas e possuem elevado poder de controle estrutural.

Niri et al (2010) estudaram a aplicação de múltiplos ADS em estruturas com incerteza, submetida à excitação harmônica, utilizando algoritmos genéticos para o dimensionamento dos ADS. Lin et al (2010) utilizaram múltiplos ADS considerando uma limitação nos seus deslocamentos como uma restrição de projeto, tendo em vista que quanto maior os deslocamentos do ADS mais espaço será necessário para a alocação do mesmo. Construiu-se um modelo reduzido de três pavimentos para ensaio. O trabalho comparou a utilização de cinco ADS instalados em paralelo com a estrutura sem controle. Os resultados mostraram a eficiência de múltiplos ADS no controle das oscilações de

estruturas, mesmo com a limitação no deslocamento dos ADS. A utilização de múltiplos ADS também se mostrou robusta quando os parâmetros do modelo são incertos, mostrando-se um eficiente método para controlar a resposta de estrutura submetida à ação dinâmica.

Moon (2010) estudou a performance de múltiplos ADS distribuídos verticalmente em uma estrutura. Visto que os osciladores são comumente instalados no pavimento mais alto da estrutura, ocupando um significativo espaço, em estruturas muito altas, esses espaços possuem uma vista privilegiada e poderiam ser utilizados com ocupações de turismo e lazer. Como esperado, a utilização de múltiplos ADS distribuídos verticalmente não se mostrou tão eficiente quanto a utilização convencional, entretanto a perda de eficiência não apresentou ser tão significativa. Visto que há economia de espaço nos pavimentos mais elevados e a dificuldade de instalação dos múltiplos ADS é menor, múltiplos ADS distribuídos verticalmente torna-se uma alternativa interessante mesmo não obtendo resultados melhores que o método convencional.

Com o intuito de avaliar a elevação ideal para um ADS simples, Hadi e Arfiad (2011) aplicaram um mecanismo binário ao algoritmo de busca AG (BCGA), a fim de obter um algoritmo capaz de determinar também o pavimento ideal para instalar-se o ADS simples. A estrutura de análise continha dez pavimentos e foi submetida à ação sísmica. Ao final, Hadi e Arfiad (2011) concluíram que o ADS obtém melhor desempenho nos pavimentos mais.

Zhan et al (2013) analisaram comparativamente a eficiência de múltiplos ADS com múltiplos controladores ativos para uma estrutura excitada dinamicamente por sismo e por vento turbulento, o autor utilizando-se do algoritmo de otimização AG para o dimensionamento dos controladores, visando atenuar a resposta da estrutura segundo a norma  $H_2$ . Uma construção hipotética de três andares foi idealizada, considerando incerteza no modelo, a fim de avaliar performance de múltiplos ADS e múltiplos controladores ativos. No estudo, a utilização de múltiplos ADS mostrou-se menos eficiente em relação à utilização de múltiplos controladores ativos.

Mohebbi (2012) otimizou os parâmetros de quantidades fixas de múltiplos ADS, posicionando-os no andar mais alto de um edifício submetido à ação sísmica e ruído branco, utilizando AG para o dimensionamento dos ADS. Mohebbi (2011) testou configurações de ADS simples, 5 ADS, 10 ADS e 15 ADS. De modo geral, os resultados mostraram que o controle utilizando múltiplos ADS é mais eficiente do que a alternativa de ADS simples instalado no topo da estrutura.

Kim e Kang (2012) utilizaram um mecanismo magnético no cursor de amortecedores sintonizados, formulando um amortecedor semiativo (STMD). O amortecedor deste estudo foi aplicado em uma estrutura de estudo com 76 pavimentos submetida à ação do vento, o amortecedor semiativo foi instalado sobre o piso do pavimento 75. Utilizou-se AG para determinar as propriedades do amortecedor e também determinar a força utilizada pelo amortecedor magnético. Os resultados obtidos pelo autor mostraram que o mecanismo semiativo com redução de deslocamentos por via magnética são superiores ao desempenho de ADS, os resultados do amortecedor semiativo estudado assemelham-se aos resultados de um atenuador dinâmico ativo, mas com uma redução significativa no consumo de energia.

Tuan e Shang (2014) investigaram a eficiência do ADS de 660 toneladas instalado no edifício Taipei 101. A edificação foi modelada computacionalmente via método dos elementos finitos e sujeita à ação dinâmica do vento e de sismos. Para a análise da estrutura submetida à ação do vento, o ADS projetado apresentou 33,8% de eficiência no controle estrutural, tendo em vista a aceleração total do edifício e os modelos estudados apresentaram adequada conformidade nos resultados. No entanto, quando a estrutura está submetida à ação de sismos o ADS apresentou apenas 13% de eficiência no controle das acelerações.

Domaneschi e Martinelli (2015) utilizaram ADS para atenuar o efeito dinâmico proveniente da ação do vento em pontes, o ADS apresentou resultados bastante satisfatórios no controle estrutural deste tipo de estrutura, mostrando ser um dispositivo de controle com grande diversidade de aplicação.

Sakr (2015) desenvolveu um estudo sobre múltiplos ADS em estruturas altas submetidas à ação dinâmica do vento. O autor propôs que o próprio piso do pavimento funcione como um ADS, possibilitando que cada pavimento possua no mínimo um ADS. O trabalho avalia o poder de controle de estruturas baixas de 5 pavimentos, estruturas médias de 25 pavimentos e arranha-céus de 50 pavimentos, tendo em vista que a quantidade de ADS é relativa ao número de pavimentos da estrutura. O estudo comprovou que arranha-céus tendem a obter um controle maior na resposta da estrutura, quando submetida à ação do vento, obtendo uma redução de 87% na resposta da estrutura.

### 3. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo tem a finalidade de explicar conceitos clássicos da metodologia. A sessão 3.1 destina-se aos fundamentos da dinâmica das estruturas, possibilitando calcular a resposta da estrutura frente uma carga dinâmica. A sessão 3.2 destina-se aos fundamentos a respeito de controladores estruturais, mecanismos de controle que minimizam a resposta dinâmica das estruturas. A sessão 3.3 tem a finalidade de apresentar fundamentos que propiciam a geração das cargas oriundas do vento dinâmico. Na sessão 3.4, apresentam-se os fundamentos sobre otimização estrutural, com foco nos algoritmos *Harmony Search* e BSA, com o propósito de dimensionar ADS para que minimize a resposta dinâmica da estrutura.

#### 3.1. DINÂMICA DAS ESTRUTURAS

##### 3.1.1. Princípio de Hamilton

De acordo com a mecânica analítica, um sistema mecânico conservativo pode ser energeticamente representado através da sua *Lagrangiana*, Equação 01,

$$L = T - V \quad (01)$$

onde  $T$  e  $V$  representam a energia cinética e energia potencial do sistema mecânico, respectivamente. A equação do movimento do sistema pode ser escrita de acordo com a Equação 02, equação de Euler-Lagrange (REINHARDT, 1980),

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_r} = 0 \quad r = 1, 2, 3 \dots n \quad (02)$$

expressa em termos de suas coordenadas generalizadas ( $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n, t$ ) (LEMONS, 2007).

Dado um sistema mecânico descrito pela *lagrangiana*  $L(\bar{q}, \dot{\bar{q}}, t)$ , define-se *ação*, Equação 03, como sendo a função que descreve a trajetória do sistema mecânico (CALKIN, 1996),

$$A_r = \int_{t_0}^{t_1} L(\bar{q}, \dot{\bar{q}}, t) dt = 0 \quad (03)$$

mantidos os pontos inicial e final fixos dentro do espaço de configuração, o valor desta integral depende, fundamentalmente, da trajetória hipotética do sistema. Portanto, a ação  $A_r$  é um *funcional* da trajetória do sistema (LEMOS, 2007).

Dentre todos os movimentos imagináveis do sistema mecânico, o movimento real do sistema é aquela que minimiza o *funcional* ação  $A_r$ , o que denominamos princípio da mínima ação ou princípio de Hamilton, Equação 04 (GOLDSTEIN, 2001).

$$\delta A_r = \delta \int_{t_0}^{t_1} L(\bar{q}, \dot{\bar{q}}, t) dt = 0 \quad (04)$$

A variação da ação  $A_r$  é representada na Equação 05,

$$\delta A_r = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{r=1}^n \left[ \frac{\partial L}{\partial q_r} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} \right) \right] = 0 \quad (05)$$

De modo geral, a equação do movimento de *Lagrange* define o movimento infinitesimal, dando-se um passo de cada vez. Enquanto a equação do movimento mecanismo estacionário é uma integral, da qual considera o movimento global do sistema do início ao fim (CALKIN, 1996).

O problema dinâmico tratado no princípio de Hamilton não é restrito aos sistemas conservativos, em muitos casos da engenharia o sistema dissipa energia durante o movimento devido às forças não conservativas. A atuação de forças não conservativas sobre o sistema mecânico implica na alteração da Equação 02, resultando na Equação 06 (NESBET, 2004),

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_r} = \widehat{Q}_r \quad (06)$$

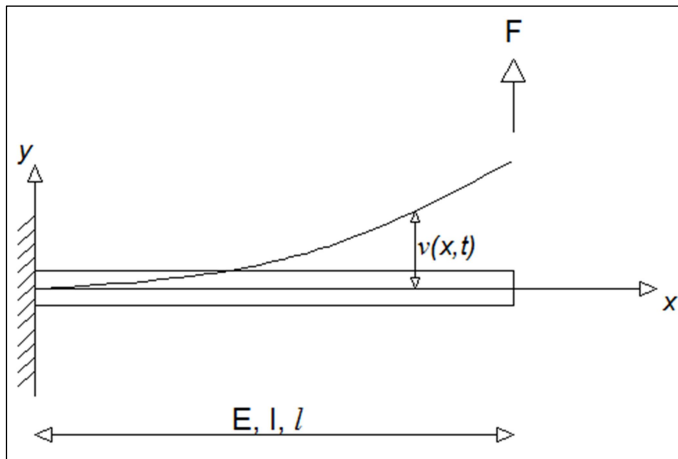
o termo dissipativo, dado na forma  $\widehat{Q}_r$ , atua de acordo com as coordenadas generalizadas  $q_r$  (NESBET, 2004). Inserindo o termo dissipativo na Equação 05, tem-se a Equação 07 (LEMOS, 2007).

$$\delta A_r = \int_{t_0}^{t_1} \delta L dt + \int_{t_0}^{t_1} \widehat{Q}_r \delta q_r dt = 0 \quad (07)$$

### 3.1.2. Princípio de Hamilton aplicado a sistemas contínuos – vibrações livres

Nesta sessão, o princípio de Hamilton será estendido a sistemas de vigas contínuas sujeitas a vibrações livres. Inicialmente, consideremos a Figura 4, que representa uma viga de *Euler-Bernoulli*, com deslocamento dado através da função  $v(x,t)$ . A energia de deformação elástica de flexão pode ser escrita na forma da Equação 08 (BATHE, 1996),

Figura 4 – Esquema da deformação elástica de uma viga contínua



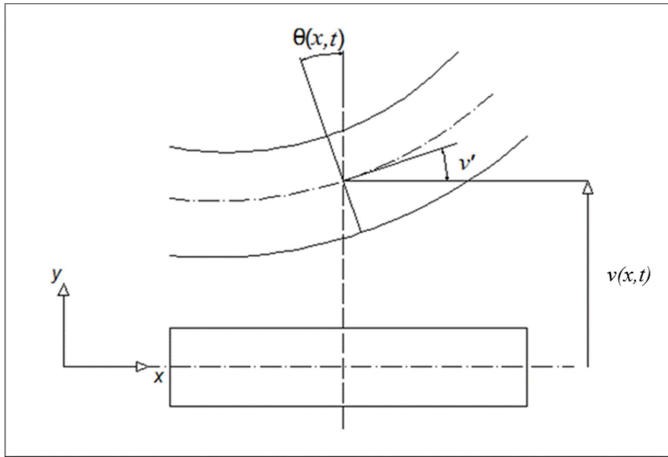
Fonte: autoria própria.

$$V = \frac{1}{2} EI \int_{x=0}^l \left( \frac{d^2v}{dx^2} \right)^2 dx \quad (08)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade do material,  $I$  é o momento de inércia da seção,  $l$  é o comprimento total da viga e  $v$  é o deslocamento em um determinado ponto da viga.



Figura 5 – Deslocamento transversal e rotação da seção em função do tempo e do comprimento da viga.



Fonte: autoria própria.

A energia potencial do sistema pode ser escrita de acordo com a Equação 09,

$$T = \frac{1}{2} \rho \int_{x=0}^L \int_A (\dot{v}^2 + \dot{\theta}^2 y^2) dA dx \quad (09)$$

de modo que  $\int_A y^2 dA = I$ , reescrevemos a Equação 09 de acordo com a Equação 10.

$$T = \frac{1}{2} \rho \int_{x=0}^L (A \dot{v}^2 + I \dot{\theta}^2) dx \quad (10)$$

Para vibrações livres, o trabalho das forças externas é nulo. A *Lagrangiana* (Equação 04) do problema da viga de *Euler-Bernoulli* é expressa de acordo com a Equação 11 (GOLDSTEIN, 2001).

$$L = \frac{1}{2} \rho \int_{x=0}^L (A \dot{v}^2 + I \dot{\theta}^2) dx - \frac{1}{2} EI \int_{x=0}^L \left( \frac{d^2 v}{dx^2} \right)^2 dx \quad (11)$$

Soluções aproximadas podem ser obtidas minimizando a integral do funcional *Ação* da Equação 01, para a *Lagrangiana* da Equação 11. A seguir será apresentada a solução via método dos elementos finitos (MEF).

### 3.1.3. Vibrações livres segundo MEF e princípio de Hamilton

A aplicação do Método dos Elementos Finitos requer que a estrutura de análise seja discretizada, deve-se dividi-la em elementos simples nos quais se formula uma aproximação para o campo de deslocamentos transversais  $v(x, t)$ , como descrito na Equação 12,

$$v(x, t) = [\psi_1(x), \psi_2(x), \psi_3(x), \psi_4(x),] \begin{Bmatrix} v_1(t) \\ \theta_1(t) \\ v_2(t) \\ \theta_2(t) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$v(x, t) = \boldsymbol{\psi} \mathbf{x}(t) \quad (13)$$

onde  $\boldsymbol{\psi}$  é o vetor de funções de forma,  $\mathbf{x}(t)$  é o vetor de deslocamentos nodais do elemento,  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$ ,  $\theta_1(t)$  e  $\theta_2(t)$  são deslocamentos e rotações nos nós, respectivamente, e as funções de forma são descritas na Equação 14 (BATHE, 1996).

$$\begin{cases} \psi_1 = 1 - 3 \left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2 \left(\frac{x}{l}\right)^3 \\ \psi_2 = x \left[ 1 - 2 \frac{x}{l} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \right] \\ \psi_3 = 3 \left(\frac{x}{l}\right)^2 - 2 \left(\frac{x}{l}\right)^3 \\ \psi_4 = l \left[ \left(\frac{x}{l}\right)^3 - \left(\frac{x}{l}\right)^2 \right] \end{cases} \quad (14)$$

Utilizando a Equação 14, sobre a formulação energética da Equação 11 e realizando a integral, obtém-se a Equação 15,

$$L^e = \frac{1}{2} \vec{\mathbf{x}}^T \mathbf{M}^e \vec{\mathbf{x}} - \frac{1}{2} \vec{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}^e \vec{\mathbf{x}} \quad (15)$$

onde  $L^e$  é a *Lagrangiana* do elemento,  $\mathbf{x}$  é o vetor de deslocamentos nodais do elemento,  $\mathbf{M}^e$  e  $\mathbf{K}^e$  são as matrizes de massa e de rigidez do elemento, respectivamente. A matriz de massa é dividida em uma parcela rotacional e outra translacional, de acordo com a Equação 16.

$$\mathbf{M}^e = \mathbf{M}_T^e + \mathbf{M}_R^e \quad (16)$$

Assim, as matrizes de massa translacional e rotacional são matrizes simétricas expressas nas Equações 17 e 18; a matriz de rigidez, também simétrica, é expressa na Equação 19 (BATHE, 1996).

$$\mathbf{M}_T^e = \frac{\rho Al}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ & & 156 & -22l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{M}_R^e = \frac{\rho Al}{120} \begin{bmatrix} 36 & 3l & -36 & -3l \\ & 4l^2 & -3l & -l^2 \\ & & 36 & -3l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{K}^e = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & -6l \\ & 4l^2 & -6l & -2l^2 \\ & & 12 & -6l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Aplicando-se a Equação 03 para as vigas, e considerando a *Lagrangiana* do problema na Equação 15, pode-se descrever a equação de equilíbrio do sistema mecânico, Equação 20.

$$\mathbf{M}^e \ddot{\vec{\mathbf{x}}}(t) + \mathbf{K}^e \vec{\mathbf{x}}(t) = 0 \quad (20)$$

Utilizando a equação do equilíbrio, descrita na Equação 20, pode-se determinar a frequência natural do sistema, como denota a sessão a seguir. Após, são apresentados métodos numéricos para se solucionar a equação do movimento.

### 3.1.4. Análise modal

Partindo-se da equação do movimento na Equação 20, de um sistema não amortecido, considerando os deslocamentos e aceleração nodais  $\vec{x}$  e  $\ddot{\vec{x}}$ , respectivamente, tem-se a Equação 21.

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{x}} + \mathbf{K}\vec{x} = 0 \quad (21)$$

A solução do sistema não amortecido sujeito à força nula pode ser detalhada de acordo com a Equação 22,

$$\vec{x}(t) = \vec{C}_n \text{sen}(\omega_{nn}t + \phi_n) \quad (22)$$

onde o parâmetro  $\vec{C}_n$  é um vetor de constantes,  $\phi_n$  é a constante de fase dos  $n$  graus de liberdade,  $t$  é a coordenada tempo e  $\omega_{nn}$  representa a frequência natural do sistema.

A derivada de segunda ordem da Equação 22 é representada na Equação 23, da qual representa a aceleração do sistema,

$$\ddot{\vec{x}}(t) = -\omega_{nn}^2 \vec{C}_n \text{sen}(\omega_{nn}t + \phi_n) \quad (23)$$

a Equação 22 e Equação 23 serão introduzidas na equação do movimento, Equação 21; logo, obtém-se a Equação 24,

$$-\omega_{nn}^2 \mathbf{M}\vec{C}_n \text{sen}(\omega_{nn}t + \phi_n) + \mathbf{K}\vec{C}_n \text{sen}(\omega_{nn}t + \phi_n) = \vec{0} \quad (24)$$

para que a Equação 24 seja igual ao vetor nulo e com  $\text{sen}(\omega_{nn}t + \phi_n) \neq 0$ , tem-se a Equação 25,

$$-\omega_{nn}^2 \mathbf{M}\vec{C}_n + \mathbf{K}\vec{C}_n = 0 \quad (25)$$

de modo que as únicas soluções não-triviais são aquelas que satisfazem a Equação 26.

$$\det(\mathbf{K} - \omega_{nn}^2 \mathbf{M}) = 0 \quad (26)$$

Pré-multiplicando a inversa de  $\mathbf{M}$  com a Equação 25 e introduzindo-se a igualdade  $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} = \mathbf{D}$ , chega-se à Equação 27,

$$|-\omega_{nn}^2 \mathbf{I} + \mathbf{D}| = 0 \quad (27)$$

fazendo-se  $\lambda = -\omega_{nn}^2$ , tem-se a Equação 28,

$$|\lambda \mathbf{I} + \mathbf{D}| = 0 \quad (28)$$

a Equação 28 denomina-se um típico autop problema, onde se possibilita obter os  $n$  autovalores do problema, dos quais são denominados como o quadrado das frequências naturais do sistema não amortecido. Os respectivos autovetores do problema são os vetores do modo de vibrar associado à cada frequência do sistema mecânico. Esses vetores representam a deformada do sistema para cada uma das frequências naturais. Agrupando os vetores do modo de vibrar tem-se a matriz modal do sistema na Equação 29 (CLOUGH E PENZIEN, 2003).

$$\Phi = [\vec{C}_1 \vec{C}_2 \dots \vec{C}_n] \quad (29)$$

### 3.1.5. Integração numérica

A integração numérica tem como objetivo aproximar o valor de uma dada integral definida sem o uso de uma expressão analítica para a sua primitiva. Na dinâmica, a utilização da integração numérica dispensa a necessidade do prévio cálculo dos autovalores e autovetores da estrutura, exigência do método da superposição modal. Para isto, devem-se considerar duas proposições: a primeira refere-se ao equilíbrio, em que a estrutura não necessita satisfazer a equação do movimento para todo o domínio, mas para um número finito de instantes separados por intervalos discretos  $\Delta t$ ; a segunda consiste em admitir uma função para representar a variação da aceleração dentro do intervalo de tempo  $\Delta t$ . A velocidade e o deslocamento serão provenientes da função aceleração admitida. A convergência e a exatidão dependerão da capacidade das funções adotadas para representar a aceleração com precisão dentro do intervalo de tempo  $\Delta t$ , bem como o tamanho desse intervalo.

Os métodos de integração numérica podem ser classificados como implícitos ou explícitos. O método explícito obtém a solução no instante  $t_i$  fazendo o equilíbrio no instante anterior. Como exemplo, tem-se o Método de Integração de Diferença Finita Central. O método implícito calcula a solução para o instante  $t_i$ , fazendo equilíbrio neste mesmo instante; é o caso dos métodos de integração de Newmark e integração de Wilson- $\theta$  (SORIANO, 2009; MIGUEL L. F., 2002). O presente trabalho fará uso do método de integração de Newmark para calcular a resposta da estrutura.

Newmark apresentou um conjunto de procedimento de integração, partindo da premissa que a aceleração entre o intervalo de tempo  $t$  e  $t + \Delta t$  varia linearmente, possibilitando obter uma série de equações que vinculam os vetores de deslocamento com os vetores de velocidade e aceleração (COOCK, 2002). Inicialmente pode-se definir a velocidade e o deslocamento no passo de tempo  $t + \Delta t$  através da Equação 30 e Equação 31, partindo da hipótese de que a aceleração do sistema varia entre os instantes  $t$  e  $t + \Delta t$  de forma linear,

$$\vec{x}_{t+\Delta t} = \vec{x}_t + [(1 - \eta)\vec{\ddot{x}}_t + \eta\vec{\ddot{x}}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (30)$$

$$\vec{x}_{t+\Delta t} = \vec{x}_t + \vec{\dot{x}}_t\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\vec{\ddot{x}}_t + \alpha\vec{\ddot{x}}_{t+\Delta t}\right]\Delta t^2 \quad (31)$$

tendo em vista que  $\eta$  e  $\alpha$  são parâmetros determinados a fim de obter precisão e estabilidade na integração, estes parâmetros são pré-estabelecidos e geralmente variam entre 0 e 1. Originalmente, os parâmetros de ajustes foram determinados sendo  $\eta=0,5$  e  $\alpha=0,25$ , considerando parâmetros de um método incondicionalmente estável.

De acordo com Clough e Penzien (2003) a equação do movimento (Equação 20) descrita sob as hipóteses do Capítulo 4.3.1.2, podemos reescrevê-la na Equação 32, de modo que passamos a considerar o amortecimento do sistema mecânico, representado com a matriz  $\mathbf{C}$  e considerando as forças externas no equilíbrio do problema.

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\vec{x}}(t) + \mathbf{K}\vec{x}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (32)$$

Assim, pode-se reescrever a equação do movimento para o caso amortecido e considerando o equilíbrio com as forças externas do sistema  $\mathbf{F}_{t+\Delta t}$ , para o instante  $t + \Delta t$ , resultando na Equação 33.

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{x}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}\dot{\vec{x}}_{t+\Delta t} + \mathbf{K}\vec{x}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} \quad (33)$$

Utilizando a Equação 31 obtém-se  $\ddot{\vec{x}}_{t+\Delta t}$  em termos dos deslocamentos  $\vec{x}_{t+\Delta t}$  e, substituindo a expressão resultante na Equação 30, obtém-se  $\dot{\vec{x}}_{t+\Delta t}$  em termos de  $\vec{x}_{t+\Delta t}$ . Introduzindo as equações calculadas na Equação 33, a fim de deixa-las em função de  $\vec{x}_{t+\Delta t}$ , pode-se reescrevê-la como denota a Equação 34 (BATHE, 1996),

$$\widehat{\mathbf{K}}\vec{x}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} \quad (34)$$

do qual,  $\widehat{\mathbf{K}}$  são constantes e  $\mathbf{F}_{t+\Delta t}$  são as forças externas no instante  $t + \Delta t$ . Através de um procedimento implícito, onde a Equação 33 deve ser resolvida para cada intervalo de tempo, obtém-se o vetor deslocamento em  $t + \Delta t$ .

De acordo com Bathe (1996) o algoritmo completo da integração de Newmark pode ter seus passos detalhados como segue:

1. Formar a matriz de rigidez  $\mathbf{K}$  e a matriz de massa  $\mathbf{M}$ .
2. Determinar a aceleração inicial  $\ddot{\vec{x}}_0$  em função de  $\vec{x}_0$  e  $\dot{\vec{x}}_0$  (valores iniciais de deslocamento e velocidade).

3. Escolher  $\Delta t$  e parâmetros  $\eta$  e  $\alpha$  e calcular as constantes:

$$\begin{cases} \eta \geq 0,5 \\ \alpha \geq 0,25(0,5 + \alpha)^2 \end{cases}$$

$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}; \quad a_1 = \frac{\eta}{\alpha \Delta t}; \quad a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}; \quad a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1;$$

$$a_4 = \frac{\eta}{\alpha} - 1; \quad a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\alpha}{\eta} - 2 \right); \quad a_6 = \Delta t(1 - \eta);$$

$$a_7 = \Delta t \eta;$$

4. Calcular a matriz  $\hat{\mathbf{K}}$ :  $\hat{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{C}$ .

5. Triangularizar  $\hat{\mathbf{K}}$ :  $\hat{\mathbf{K}} = \mathbf{LDL}^T$

6. Calcular o vetor de cargas efetivas no tempo  $t + \Delta t$ :

$$\hat{\mathbf{F}}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} + \mathbf{M}(a_0 \vec{x}_t + a_2 \vec{\dot{x}}_t + a_3 \vec{\ddot{x}}_t) + \mathbf{C}(a_1 \vec{x}_t + a_4 \vec{\dot{x}}_t + a_5 \vec{\ddot{x}}_t)$$

7. Resolver por retro-substituição no tempo  $t + \Delta t$ :

$$\mathbf{LDL}^T \vec{x}_{t+\Delta t} = \hat{\mathbf{F}}_{t+\Delta t}$$

8. Calcular as acelerações e velocidades no tempo  $t + \Delta t$ :

$$\begin{aligned} \vec{\ddot{x}}_{t+\Delta t} &= a_0 (\vec{x}_{t+\Delta t} - \vec{x}_t) - a_2 \vec{\dot{x}}_t - a_3 \vec{\ddot{x}}_t \\ \vec{\dot{x}}_{t+\Delta t} &= \vec{\dot{x}}_t + a_6 \vec{\dot{x}}_t - a_7 \vec{\ddot{x}}_{t+\Delta t} \end{aligned}$$



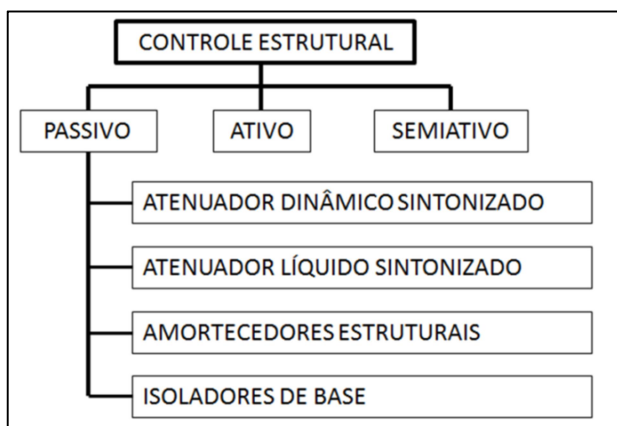
### 3.2. CONTROLE ESTRUTURAL

A fim de atenuar as vibrações em edifícios, P. Mahmoodi (1969) sugere a utilização de controladores estruturais. Esses dispositivos possuem grande eficiência no controle de vibrações. Os controladores estruturais são projetados para que parte da energia mecânica da edificação seja dissipada, reduzindo a amplitude do movimento da estrutura frente à ação vibratória.

Além de edifícios altos, outras estruturas, como pontes, torres, ginásios, entre outras, podem comportar controladores estruturais a fim de reduzir o movimento vibratório. De modo geral, o movimento vibratório pode estar atrelado aos fenômenos naturais, como vento; também podem ser provenientes da própria utilização, como, por exemplo, do tráfego intenso de automóveis ou pedestres. Essas ações podem causar desconforto na utilização da estrutura ou até acarretar em danos estruturais (MIGUEL, 2002).

Nas últimas décadas, intensificaram-se os estudos sobre tipos de controladores estruturais. Esses têm a finalidade de modificar o comportamento dinâmico da estrutura, deixando-a menos sensíveis à ação de natureza dinâmica. De modo geral, os controladores podem ser divididos em três tipos (NEMIR et al, 1994): passivos, semiativos e ativos, como demonstrado na Figura 6:

Figura 6 – Tipos de amortecedores



Fonte: autoria própria.

### 3.2.1. Sistema de controle de estruturas

Como visto anteriormente, os controladores estruturais podem ser divididos em controladores passivos, ativos e semiativos, de acordo com a Figura 06. A seguir segue uma sucinta abordagem de suas principais características.

Os controladores passivos entram em funcionamento junto com a solicitação da estrutura, ao passo que a estrutura é excitada, parte da energia é transmitida ao controlador, o qual tem a responsabilidade de dissipar parte dessa energia, geralmente na forma de calor. O controlador passivo é comumente projetado com frequência próxima à frequência mais baixa da estrutura, porém atuando em fases opostas.

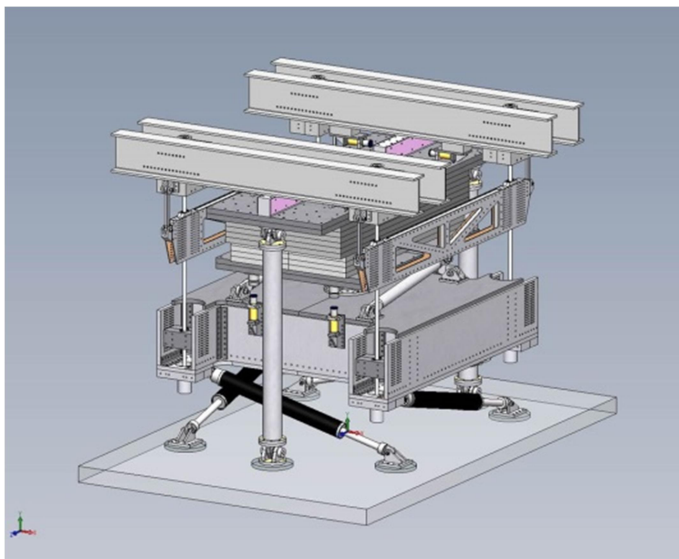
Em suma, os controladores passivos possuem atenuação mais branda em relação aos dispositivos de controle ativo e semiativo. Entretanto, não necessitam de informações sobre o comportamento da estrutura diante a solicitação, não há a necessidade de energia externa para ativação e possui o menor custo de instalação dentre os três tipos (MIGUEL, 2002).

O controlador passivo pode ser subdividido quanto ao mecanismo de dissipação de energia, quando parte da energia do movimento da estrutura é transferida para a massa do dispositivo na forma de movimento, este tem o nome de atenuadores dinâmicos sintonizados (abreviado como ADS). Além deste, existem os atenuadores líquidos sintonizados, amortecedores estruturais e isoladores de base. Entre esses, o ADS possui vasta utilização no controle estrutural de edifícios, devido à sua simplicidade. Neste trabalho, adotou-se ADS em todos os exemplos.

O termo ADS é caracterizado por possuir apenas um grau de liberdade, livre para trasladar no sentido horizontal, possui disposição em paralelo de mola e amortecedor ligados à massa. A massa é capaz de mobilizar energia cinética suficiente para contrabalançar a oscilação da estrutura, a mola possui a função de estocar energia potencial, enquanto o amortecedor tem a finalidade de dissipar a energia, como mencionado anteriormente.

Na Figura 7, pode-se ver o ADS projetado por Andrew Smith da empresa RWD inc (JAVELIN, 2015). Esse modelo foi projetado com massa de 325 toneladas, utilizado para minimizar a amplificação dinâmica dos edifícios sujeitos a tempestades e ventos fortes na região de Nova Iorque.

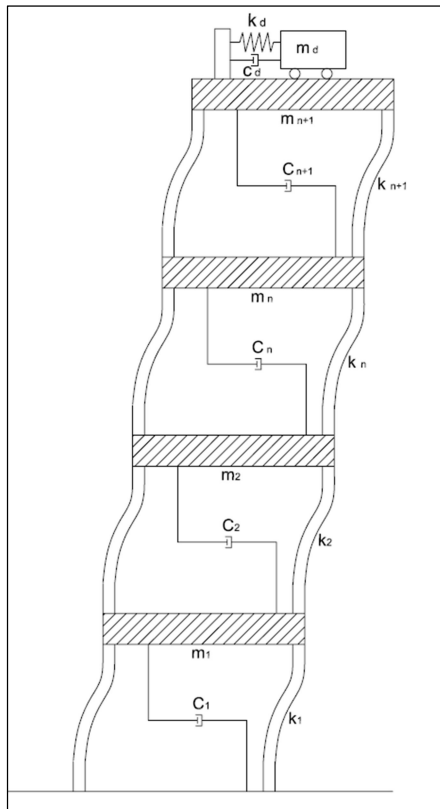
Figura 7 – Exemplo de amortecedor viscoso, atenuador dinâmico sintonizado ADS



Fonte: JAVELIN (2015).

Neste estudo, propõe-se a utilização de ADS instalado no topo da estrutura, local onde normalmente possui maior amplitude nos deslocamentos, também serão analisados sistemas com múltiplos ADS. A Figura 8 mostra o croqui da estrutura com ADS acoplado no topo.

Figura 8 – Esquema ilustrando a instalação do ADS no topo da estrutura.



Fonte: autoria própria.

Os controladores ativos funcionam com retroalimentação, necessitam de grande quantidade de energia para seu funcionamento e informações a respeito do comportamento da estrutura diante a ação vibratória. O exemplo mais utilizado na prática é o amortecedor de massa ativo (AMS – *Active mass damper*).

Os controladores ativos possuem um elevado custo de instalação e de utilização, em relação aos controladores passivos, principalmente em virtude da energia externa necessária para o funcionamento. Este tipo de controlador também pode acarretar amplificação dinâmica na estrutura se houver algum problema operacional. Contudo, em geral

possuem um poder de dissipação maior que os demais tipos de controladores, em geral.

Os controladores semiativos são caracterizados por necessitarem de informações sobre o comportamento da estrutura e não necessitarem de energia externa para o funcionamento ou necessitam de uma quantidade muito baixa de energia externa.

Atualmente, os estudos sobre controladores semiativos vêm ganhando mais campo na área estrutural. Muitos desses possuem eficiência próxima aos controladores ativos, requerendo um baixo consumo de energia externa, tornando-os mecanismos bastante eficientes em relação aos demais (PESTANA, 2012).

### **3.2.2. Exemplos de aplicação na engenharia**

Os controladores possuem vasta aplicação na engenharia moderna. No Brasil, podemos ver a aplicação desses no estádio Cícero Pompeu de Toledo, Morumbi, em São Paulo. As arquibancadas do estádio sofriam amplificação dinâmica induzida pelo público. A solução veio após um minucioso estudo sobre a estrutura, e a utilização de amortecedores viscosos mostrou-se a alternativa mais eficiente para o problema em questão, o estádio recebeu 60 amortecedores instalados em tirantes sob a arquibancada. Em entrevista à revista *Téchne* de 1º de maio de 1998 (JULIANI; BECOCCI, 1998), o antigo diretor do clube que administra o estádio, Luiz Cholfe, comentou que o custo total da obra girou em torno de R\$ 10 milhões.

Na ponte Rio-Niterói foi instalado amortecedor do tipo ADS a fim de reduzir as oscilações no vão central. A ponte possui 72 m de altura em relação ao nível do mar e possui 300 m de vão, possibilitando o trânsito de grandes embarcações - fatores que favoreciam a amplificação dinâmica do vão central quando os ventos ultrapassavam 60 km/h.

A utilização de mecanismos de controle pode ser encontrada em diversas localidades, a Tabela 1 mostra algumas edificações com controladores instalados na estrutura.

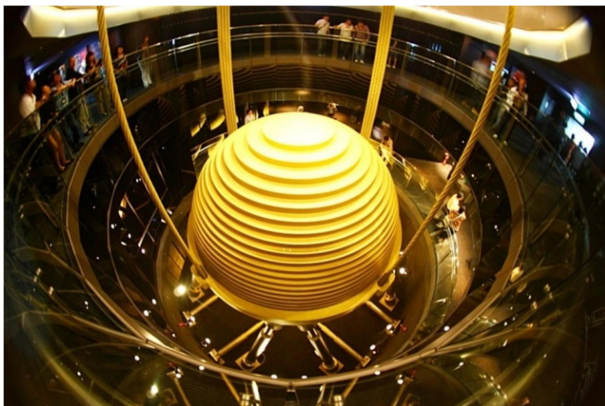
Tabela 1 – Utilizações de controladores estruturais em obras civis.

| <b>Nome</b>                                     | <b>Local</b> | <b>Ano</b> | <b>Andares<br/>acima do<br/>solo</b> | <b>Tipo de<br/>controlador</b>                   |
|---|--------------|------------|--------------------------------------|--|
| Crystal Tower                                   | Osaka        | 1990       | 37                                   | ADS  |
| Sendagay Intes                                  | Tokyo        | 1991       | 11                                   | Controlador<br>ativo                             |
| Applause Tower                                  | Osaka        | 1992       | 34                                   | Controlador<br>ativo                             |
| P&G Japan<br>Main Office<br>Technical<br>Center | Hyogo        | 1993       | 31                                   | ADS  |
| Atami Korakuen<br>Hotel                         | Shizuoka     | 1996       | 19                                   | Amortecedor<br>por atrito                        |
| Herbis Osaka                                    | Osaka        | 1997       | 40                                   | Controlador<br>ativo e<br>amortecedor<br>viscoso |
| Dainihoninsatsu<br>Main Office                  | Tokyo        | 1998       | 10                                   | Amortecedor<br>viscoso                           |
| Taipei 101                                      | Taipei       | 2004       | 101                                  | ADS  |

Fonte: autoria própria

Taipei 101 está entre as estruturas mais conhecidas da engenharia no quesito de controladores estruturais. Possui seu ADS formado por um grande pêndulo exposto ao público, funcionando como ponto turístico. Na Figura 9, exhibe-se a imagem do local turístico do pêndulo de Taipei 101.

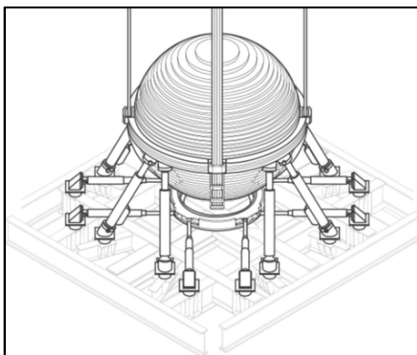
Figura 9 – Ilustração do ADS em forma de pêndulo instalado em Taipei 101.



Fonte: BJJ (2011).

O pêndulo de Taipei possui uma bola de ferro fundido com 680 toneladas e está posicionado no 92º pavimento. Taipei 101 foi projetado para suportar terremotos de 7 graus na escala Richter e ventos de 450 km/h. A Figura 10 apresenta um croqui do controlador instalado no Taipei 101, podendo-se visualizar com nitidez a massa, a mola e os amortecedores.

Figura 10 – Croqui do pêndulo instalado em Taipei 101.



Fonte: autoria própria

### 3.3. FORÇA DO VENTO EM ESTRUTURAS

Pode-se dizer que estruturas altas e esbeltas tornam-se mais sensíveis à ação do vento. Para dimensionarmos controladores estruturais que diminuam a sensibilidade destas estruturas frente esta ação, é necessário fazer um estudo que possibilite simular o sinal turbulento do vento.

De modo geral, ventos são movimentações do ar sobre a atmosfera. Oriundas, principalmente, das diferenças de pressão resultantes da variação da temperatura na crosta terrestre, fazendo o ar deslocar-se de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão; esses deslocamentos de ar também sofrem influências da rotação da terra, força de Coriolis, as forças de inércia com as forças de Coriolis causam uma trajetória curvilínea nas massas de ar presentes nos hemisférios (BLESSMANN, 1995).

Os ventos que possuem forte intensidade são designados tormentas (*storms*), independente do seu mecanismo de formação. Para a engenharia estrutural, os ventos de maior interesse são os de grande intensidade, capazes de gerar oscilação na estrutura. Ventos alísios, contra-alísios, monções e brisas são oriundos da circulação atmosférica e não causam grande oscilação nas estruturas por serem ventos mais brandos.

Os ventos fortes podem ser divididos em ciclones tropicais, ciclones extratropicais, tormentas elétricas e tornados, conforme Blessmann (1995). Os ciclones extratropicais ou tormentas EPS são o tipo de vento mais estudado na engenharia civil, estando presente nas principais normas do mundo. Possuem camada limite atmosférica e turbulências conhecidas, geradas pela rugosidade superficial do terreno. Este será o vento adotado no presente trabalho, do qual será detalhado a seguir.

#### 3.3.1. Ciclones extratropicais – Tormentas EPS

Estes ciclones são chamados de "extratropicais" porque se formam fora das zonas tropicais, em regiões de latitudes médias (entre 30° e 60°), sendo caracterizados pela ocorrência de fortes tempestades. São movimentos circulatórios em torno de um centro de baixa pressão, no seu estado maduro, são chamados de tormentas EPS (*extended pressure systems*), sistema de pressão plenamente desenvolvida ou ventos sinóticos. Caracterizam-se por uma atmosfera verticalmente



estável, podendo atingir extensões de até poucos milhares de quilômetros e podem atuar com grande estabilidade na velocidade por dezenas de horas. Os ciclones extratropicais originam ventos fortes com equilíbrio dinâmico em relação à rugosidade terrestre (BLESSMANN, 1995).

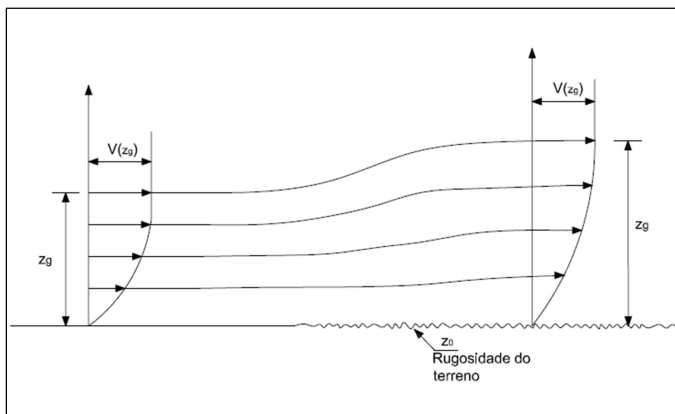
Podemos dividir o vento em uma parcela estacionária, caracterizada por sua velocidade média e uma parcela turbulenta com variações ao longo do tempo, as próximas sessões detalham expressões matemáticas que possibilitam gerar um perfil para parcela estacionária e flutuações para a parcela turbulenta do vento.

### 3.3.2. Perfil velocidade média

Para a engenharia estrutural é importante conhecer a velocidade média do vento e sua flutuação (também chamado de turbulência) causada por uma sequência de rajadas (BLESSMANN, 1995).

A velocidade média do vento em grandes alturas pode ser considerada constante, a altura para atingir a velocidade constante é chamada de altura gradiente  $z_g$ . Nessa altura, a rugosidade do terreno exerce pouca ou nenhuma interferência na velocidade do vento. Nas proximidades do solo, a velocidade sofre interferência da rugosidade do terreno, a velocidade é mínima junto ao solo e crescendo gradativamente até atingir a velocidade gradiente (BALENDRA, 1993). A Figura 11 demonstra a interferência da rugosidade do terreno sobre o perfil de velocidade média do vento, no qual  $z_g$  é a altura gradiente.

Figura 11 – Esquema da interferência da rugosidade do solo sobre a velocidade do vento.



Fonte: autoria própria.

O ar é enfrenado junto à superfície da terra devido às forças de fricção. No entanto, muito acima dos obstáculos que afetam a rugosidade do terreno, o atrito proveniente da fricção entre as camadas horizontais de ar e as tensões devido ao intercâmbio de quantidade de movimento entre estas camadas horizontais, também geram turbulência, porém menos acentuada (BLESSMANN, 1995).

Quanto maior for a rugosidade do terreno  $z_0$ , maior será a camada limite atmosférica ou altura gradiente  $z_g$ . Existem algumas expressões teóricas para formular o perfil velocidade média do vento com a altura, das quais se destacam as leis que consideram o efeito do intercâmbio da quantidade de movimento em uma camada limite turbulenta. No presente trabalho será utilizada a lei logarítmica de Prandtl. Em ventos fortes com estabilidade neutra, a validade da lei de Prandtl, até alturas de poucas centenas de metros, tem sido confirmada por medições.

A Equação 35 apresenta como determinar o perfil velocidade média de acordo com a lei logarítmica de Prandtl (BLESSMANN, 1995),

$$\bar{V}(z) = u_0^* k^{-1} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (35)$$

onde  $\bar{V}(z)$  representa a variação da velocidade média com a altura, dentro da altura gradiente,  $z$  é a variável altura,  $k$  é a constante de Kármán igual a 0,4 e  $u_o^*$  é a velocidade de fricção junto à superfície. Este último pode ser obtido substituindo-se o módulo da velocidade de um campo conhecido na altura de referência  $z_{ref} = 10m$ ,  $\bar{V}(z_{ref})$ , como mostrado na Equação 36 (MIGUEL et al., 2011).

$$u_o^* = k \frac{\bar{V}(z_{ref})}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_o}\right)} \quad (36)$$

De acordo com Blessmann (1995), o comprimento de rugosidade  $z_o$  é o fator dominante na definição dos perfis verticais da velocidade média, em ventos com estabilidade neutra, dentro da camada limite atmosférica. O valor de  $z_o$  está diretamente ligado à altura dos obstáculos que formam a rugosidade do terreno, alguns valores de  $z_o$  para diferentes tipos de terrenos podem ser vistos na Tabela 2.

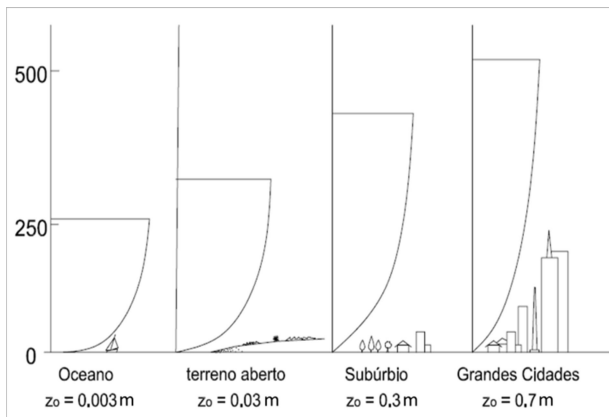
Tabela 2 – Valores para o comprimento de rugosidade

| <b>Descrição do terreno</b> | <b><math>z_o</math> (m)</b> |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Gramma baixa                | 0,001-0,004                 |
| Gramma alta                 | 0,040-0,010                 |
| Palmeiras                   | 0,100-0,300                 |
| Florestas coníferas         | 0,900-1,000                 |
| Centro de pequenas cidades  | 0,350-0,400                 |
| Centro de grandes cidades   | 0,600-0,800                 |

Fonte: Blessmann (1995)

A Figura 12 exemplifica o perfil velocidade média dentro da camada limite atmosférica para cada tipo de terreno.

Figura 12 – Perfis de velocidade média dentro da camada limite atmosférica de diferentes terrenos.



Fonte: autoria própria.

A rugosidade do terreno varia conforme o número e altura dos obstáculos. Em oceanos, a rugosidade pode ser 0,003 m, em terrenos abertos a rugosidade aproxima-se de 0,03 m, à medida que os obstáculos aumentam a rugosidade e a camada limite atmosférica também aumentam; em terrenos com florestas ou subúrbios, a rugosidade pode ser aproximadamente de 0,3 m. Para grandes cidades onde existe um acúmulo de edificações altas, a rugosidade aproxima-se de 0,7 m.

### 3.3.3. Turbulência do vento

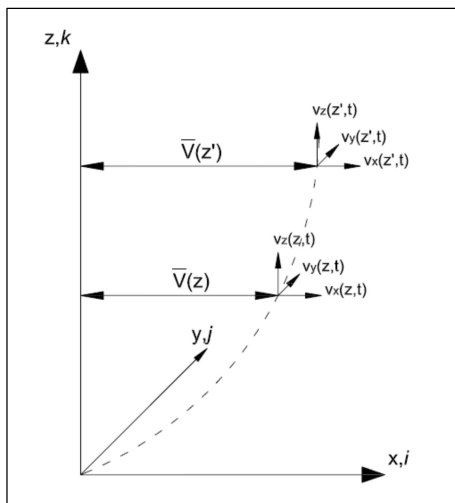
O escoamento do vento em contato com a rugosidade do terreno entra em regime turbulento, formando turbilhões. O acúmulo de turbilhões denomina-se rajadas de vento, ocorrendo em uma sequência aleatória de frequência e intensidade (BLESSMANN, 1995).

Em função da turbulência, a velocidade do vento também possui outras componentes que variam no tempo, além de sua parcela média (que é constante em relação ao tempo). A Equação 37 denota as componentes do vento composto por uma parcela estacionária e as demais parcelas transientes,

$$\mathbf{V}(\mathbf{z}, t) = \bar{\mathbf{V}}(\mathbf{z})\mathbf{i} + v_x(\mathbf{z}, t)\mathbf{i} + v_y(\mathbf{z}, t)\mathbf{j} + v_z(\mathbf{z}, t)\mathbf{k} \quad (37)$$

onde  $v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$  são as componentes do vento nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. A Figura 13 exhibe as componentes transientes somadas às componentes estacionárias do vento.

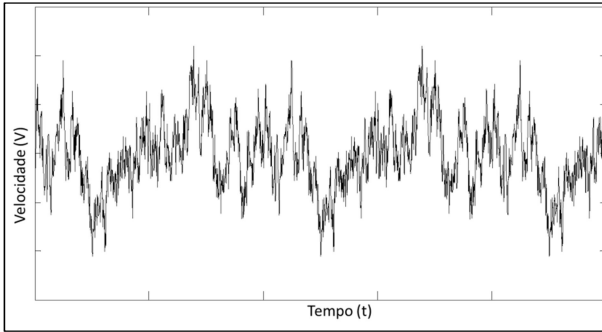
Figura 13– Componentes da velocidade do vento



Fonte: autoria própria.

A Figura 14 exhibe uma amostra do sinal turbulento do vento na direção  $\hat{i}$ , componente horizontal da velocidade média.

Figura 14 – Flutuação do vento



Fonte: autoria própria.

Em virtude da turbulência do sinal, a velocidade do vento é um fenômeno aleatório, para fins de engenharia, classifica-se a velocidade do vento como um processo estocástico estacionário e ergódico, ou seja, os parâmetros estatísticos (média, variância, autocorrelação, etc) são invariantes para qualquer passo da origem, e qualquer parâmetro estatístico calculado sobre um conjunto de registro é igual ao correspondente parâmetro calculado ao longo do tempo sobre qualquer registro representativo do processo (BLESSMANN, 1995).

A turbulência do vento pode ser avaliada através do desvio padrão do sinal ou da média quadrática (*root mean square* - RMS). Quando se avalia apenas a flutuação em torno da velocidade média do vento, a média quadrática coincide com o desvio padrão do processo, como mostra a Equação 38,

$$\sigma_u(z)^2 = \frac{1}{T_0} \int^{T_0} \{v(z, t)\}^2 dt \quad (38)$$

na qual,  $\sigma_u(z)^2$  representa a variância, a raiz da variância é o desvio padrão  $\sigma_u(z)$ ,  $v$  é a velocidade instantânea,  $T_0$  é o intervalo de tempo suficientemente longo, de acordo com Balendra (1993) esse valor deve ser em torno de uma hora.

Uma importante medida da flutuação da velocidade do vento é a intensidade de turbulência  $I_u$ , definida como a relação entre o desvio

padrão  $\sigma_u(z)$  e a velocidade média  $\bar{V}(z)$ , conforme descrito na Equação 39,

$$I_u = \frac{\sigma_u(z)}{\bar{V}(z)} \quad (39)$$

a intensidade de turbulência  $I_u$  é diretamente proporcional à rugosidade superficial do terreno.

### 3.3.4. Espectro de potência do vento

Como visto anteriormente, o vento sofre interferência dos obstáculos na superfície terrestre, formando turbilhões de dimensões variadas. A cada dimensão de um turbilhão associa-se um comprimento de onda. Portanto, turbilhões maiores possuem frequências menores. A distribuição da energia em função da frequência constitui o espectro de energia ou espectro de potência (BLESSMANN, 1995). Matematicamente, o espectro de potência de um sinal pode ser definido como a transformada de Fourier de sua função de autocorrelação.

Entre as componentes da turbulência, a parcela longitudinal é a que mais possui dados disponíveis. Na bibliografia existem muitos modelos de geração do espectro de potência da componente longitudinal, obtidos com o ajuste de funções a partir de dados experimentais. Dentre estes, podemos citar o espectro de Kaimal na Equação 40,

$$f S_i(f) = \sigma_1^2 \frac{100}{3} \left[ \frac{Y_1}{(1+50Y_1)^{5/3}} \right] \quad (40)$$

onde  $S_i(f)$  é a densidade espectral,  $f$  é a frequência e  $Y_1$  é determinada na Equação 41.

$$Y_1 = \frac{fz}{\bar{V}(z)} \quad (41)$$

As componentes flutuantes  $v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$  são consideradas realizações de um processo aleatório de média igual a zero. A partir de um espectro de potência da componente longitudinal da turbulência,

pode-se gerar numericamente uma série temporal para esta componente, pela superposição de harmônicos. Isso é descrito na Equação 42,

$$\Delta \vec{V}(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_i(f_j) \Delta f_j} \cos(2\pi f_j t + \phi_j) \quad (42)$$

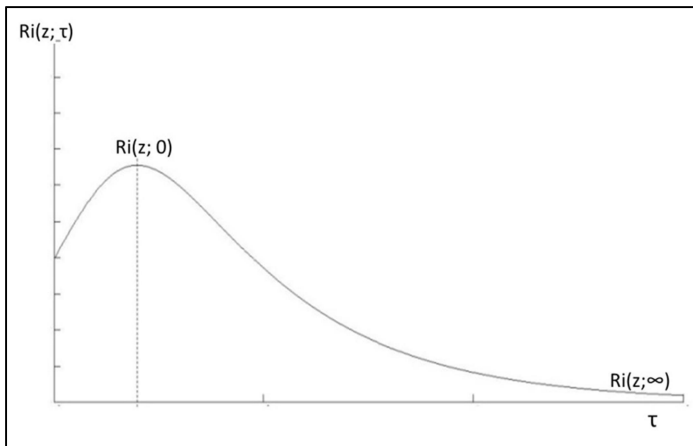
o termo  $\phi_j$  denota o ângulo de fase, definido como uma variável aleatória com densidade de probabilidade uniforme entre 0 e  $2\pi$ .

### 3.3.5. Correlação espacial

Quando as dimensões verticais e laterais de um turbilhão forem suficientemente grandes para envolver toda a estrutura, a pressão estará correlacionada entre nós adjacentes. Se os turbilhões possuírem pequenas dimensões, cada nó da estrutura possuirá pressões não correlacionadas e o efeito longitudinal da turbulência será pequeno (BALENDRA, 1993).

A Figura 15 exhibe a curva de correlação do sinal de velocidade do vento.

Figura 15 – Curva de correlação



Fonte: autoria própria.



O tempo médio dos turbilhões  $T_v$  pode ser compreendido como a área sob a curva de correlação, onde  $\tau$  é a variação temporal da velocidade  $v(t)$ . Equação 43.

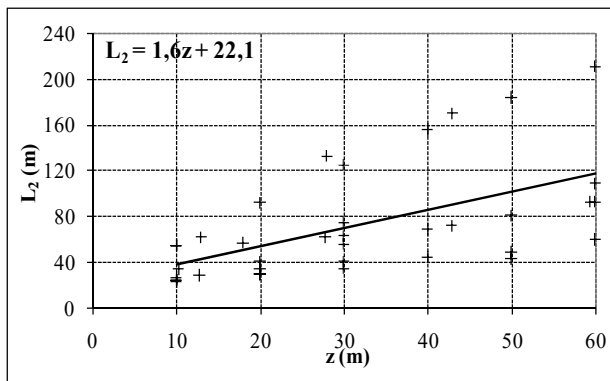
$$T_v = \int^{\infty} R_i(\tau) d\tau \quad (43)$$

Neste trabalho é adotado o esquema proposto por Riera e Ambrosini (1992). Estes autores propuseram a adoção de uma correlação espacial cruzada de forma triangular. O modelo justifica-se tendo em vista que a sua qualidade de ajuste aos dados experimentais disponíveis na literatura técnica é semelhante à obtida de outros modelos existentes na literatura. Neste esquema, exige-se apenas a definição de um parâmetro: o comprimento de correlação.

Os autores mostram que, se amostras estatisticamente independentes de um processo aleatório são geradas em pontos espaçados de um comprimento de correlação, os valores no interior de cada intervalo podem ser obtidos por interpolação linear entre os extremos. Assim, o campo aleatório resultante é caracterizado pelo espectro da componente longitudinal conhecido e pela função de correlação cruzada de forma triangular (Miguel et al., 2011).

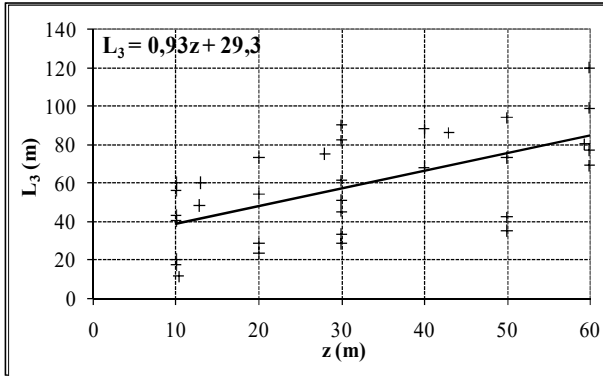
A Figura 16 e Figura 17 mostram os dados experimentais de correlação nas direções verticais e horizontais, respectivamente, obtidos por Blessmann (1995).

Figura 16 – Dados experimentais da correlação vertical.



Fonte: Miguel et al (2011)

Figura 17 – Dados experimentais da correlação horizontal



Fonte: Miguel et al (2011)

### 3.4. OTIMIZAÇÃO EM ENGENHARIA

#### 3.4.1. Conceitos de otimização

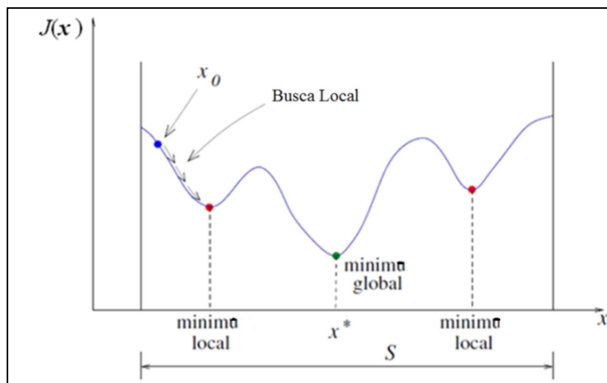
Um processo de otimização visa obter a melhor performance para uma medida pré-definida. Para tal, é preciso fazer uma adequada formulação do problema, pois o início está ligado diretamente com os resultados. Arora (1989) determina cinco etapas para a formulação do problema de otimização:

- Primeira etapa: define-se o problema indicando-se os objetivos e requerimentos do sistema.
- Segunda etapa: coleta de valores ou características envolvidas no processo. Determinam-se, também, os procedimentos e ferramentas para o processo.
- Terceira etapa: identificam-se as variáveis envolvidas no sistema, chamadas de variáveis de projeto. As variáveis devem ser independentes umas das outras e caracterizam o grau de liberdade do sistema. Caso as variáveis tenham dependências entre si, é preciso fazer equações de dependência entre as variáveis envolvidas, deixando de serem variáveis e tornando-se um dado do problema.
- Quarta etapa: realiza-se a identificação do critério a ser otimizado. Em alguns casos pode ser chamado de função objetivo do problema.
- Quinta etapa: identificam-se as restrições do problema. As restrições dependem das exigências estabelecidas pelo problema, impostas pelo projetista ou pelo operador. Muitas dessas restrições dependem das variáveis do projeto.

O objetivo da otimização é determinar os valores das variáveis de projeto de modo que a função objetivo obtenha o melhor resultado, de acordo com o objetivo traçado. Essas variáveis podem ser limitadas em certos valores, caracterizando-se um problema com restrição ou problema restringido (LOPEZ; BECK, 2012).

Se a função for não convexa em seu domínio, o resultado da otimização poderá não ser o resultado ótimo para todo o domínio, visto que a função pode ter um ou mais mínimos locais. Na prática, o mínimo local é um ponto mínimo para uma pequena porção do domínio. Na Figura 18, exemplifica-se uma função com dois mínimos locais e um mínimo global no domínio admissível  $S$ .

Figura 18 – Mínimo local e global.



Fonte: Lopez e Beck (2012).

Os algoritmos de otimização baseados em gradiente não garantem o mínimo global da função, pois dependem do seu ponto de partida. Se um algoritmo de otimização baseado em gradiente iniciar no ponto  $x_0$  (Figura 18), em geral o algoritmo convergirá somente para um mínimo local do problema (LOPEZ; BECK, 2012).

Alguns algoritmos de otimização baseiam-se na busca iterativa do mínimo da função, partindo de um ponto inicial, cada algoritmo elabora critérios distintos para mover-se de um ponto a outro, este critério é o que diferencia diferentes tipos de algoritmos de otimização.

A literatura apresenta diferentes métodos locais de otimização; entre os locais mais populares, tem-se: métodos de descida, métodos de Newton e métodos diretos. Os algoritmos de busca global são comumente desenvolvidos com análise probabilística, com o intuito de não cessar a busca em um mínimo local, dos quais podemos citar: algoritmos genéticos, *Random Search*, *Harmony Search*, BSA, etc (LOPEZ; BECK, 2012). Por fim, existem ainda os algoritmos híbridos, que combinam métodos locais e globais, desenvolvidos para reduzir o tempo computacional dos métodos globais, com buscas locais em um número pré-definido de chamadas da função objetivo.

A fim de comparar diferentes algoritmos de busca, Nocedal e Wright (2006) propõem três critérios de análise:

- Eficiência: definido como o número de chamadas da função objetivo necessárias para atingir a convergência.

- Robustez: definido como a habilidade de achar o ponto ótimo, independente da configuração do problema em particular, não importando o ponto de partida.
- Precisão: capacidade de encontrar uma solução específica, sem grandes variações no resultado entre diversas buscas.

Esses critérios de análise de algoritmo contrapõem-se. Um método que convirja rapidamente para seu mínimo possivelmente comprometerá a precisão da análise ou consumirá muita memória da máquina. Quanto maior a robustez do método, mais lenta será a busca ao mínimo global. Não existe uma combinação única para todos os problemas, diferentes problemas de otimização e diferentes algoritmos comportam-se de forma diferente diante dos critérios de análise. Cabe ao analista avaliar os critérios para definir qual algoritmo e seus parâmetros melhor convêm ao seu problema (LOPEZ; BECK, 2012).

O problema de otimização em estudo é multimodal, não convexo e com variáveis mistas. Assim, utilizar-se-á de algoritmos probabilísticos ou algoritmos heurísticos para solucionar o problema de otimização.

### 3.4.2. Algoritmos Heurísticos

Diversos algoritmos heurísticos têm sido propostos nas últimas décadas. Dentre esses, o algoritmo *Harmony Search* (HS) e *Backtracking Search Algorithm* (BSA) foram aplicados em diversos problemas de engenharia, com sucesso. Assim, o presente trabalho utilizará estes algoritmos para determinar o número ótimo da ADS em estruturas altas. A seguir, um breve resumo sobre cada algoritmo.

**Algoritmo *Harmony Search*** – O *Harmony Search* é um algoritmo que simula a improvisação dos músicos de jazz em busca de uma harmonia perfeita. O algoritmo memoriza as harmonias boas e tenta formular novas harmonias, combinando as harmonias já conhecidas (LEE; GEEM, 2005).

Definido por quatro parâmetros iniciais: número de improvisações, tamanho da memória harmônica, taxa de seleção dos dados da memória e parâmetro de ajuste dos dados. Onde o número de improvisações ou iterações (NI) representa o número de buscas que o algoritmo efetuará sobre o domínio. Os valores ótimos encontrados em cada iteração serão armazenados em um conjunto de vetores conhecido como memória harmônica (*Harmony memory size* – HMS), de tamanho definido inicialmente. As novas improvisações utilizarão os dados da

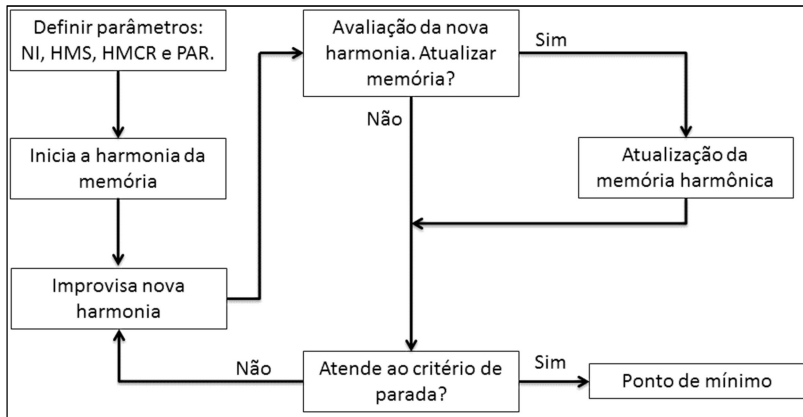
memória harmônica para improvisar uma nova harmonia. Os valores armazenados serão escolhidos segundo uma taxa de seleção (*Harmony memory considering rate* - HMCR). A nova harmonia pode ser ajustada de acordo com uma taxa de ajuste, a fim de aumentar a diversidade do processo de busca (*Pitch adjusting rate* – PAR) (SCALABRIN; PARPINELLI; LOPEZ, 2010).

Abaixo, segue a sequência do algoritmo HS:

- 1 O algoritmo inicia-se com a definição do número de iterações, definição do tamanho da memória harmônica, taxa de seleção da memória e taxa de ajuste.
- 2 A busca é iniciada segundo a formulação  $u_i = lb_i + rand(ub_i - lb_i)$ , onde  $u_i$  representa as variáveis da primeira iteração,  $ub_i$  é o limite superior das variáveis e  $lb_i$  é o limite inferior das variáveis, onde a variável aleatória tem distribuição entre 0 e 1,  $rand \in (0,1)$ . O primeiro valor será armazenado na memória harmônica.
- 3 Na *enésima* iteração selecionam-se os vetores da memória, segundo HMCR, que farão parte da nova harmonia, compondo o novo vetor ótimo.
- 4 A nova harmonia sofrerá um ajuste segundo a taxa PAR.
- 5 Se o valor da nova harmonia for melhor que o pior valor da memória harmônica, atualiza-se a memória harmônica.
- 6 Analisa-se o critério de parada para definir se a busca continua ou não.

No fluxograma da Figura 19 pode ser encontrado o processo de busca do algoritmo HS.

Figura 19 – Fluxograma do algoritmo *Harmony Search* – HS.



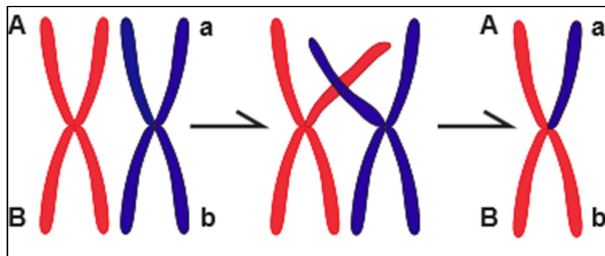
Fonte: autoria própria.

**Algoritmo BSA** – Desenvolvido por Civicioglu (2013), é um algoritmo evolucionário iterativo, com etapas de mutação e recombinação. O algoritmo BSA pode ser descrito em cinco etapas, de acordo com Civicioglu (2013), dividindo-se em:

- 1 Inicialização: determinação do tamanho da população com base nos limites inferiores e superiores do problema.
- 2 Seleção I: a população histórica é determinada e usada para calcular a direção de busca. O BSA possui uma memória das populações anteriores e a cada nova busca existe 50% de chance de haver alteração das populações anteriores.
- 3 Mutação: o processo de mutação controla a direção de busca, assim a população é gerada servindo-se da experiência da população histórica.
- 4 Recombinação: a população experimental definida na fase anterior, população mutante, nessa fase é recombinada e assume sua forma final. Indivíduos da população experimental que geram o menor valor para mínimo global, de acordo com o problema de otimização, são usados para evoluir os elementos da população. O processo de recombinação é análogo à recombinação genética vista na Figura 20.

5 Seleção II: nesta etapa os indivíduos da população final que geram os menores valores são comparados com seu correspondente na população anterior, assim os indivíduos que possuírem os melhores valores para a função são atualizados e passam a ser o mínimo global da função até o momento atual.

Figura 20 – Recombinação genética



Fonte: Assis (2014)

A Figura 20 representa o processo de recombinação da população, análogo à recombinação genética dos cromossomos. A população hipotética é idealizada como um cromossomo, sua população pode ser os braços deste cromossomo, onde o braço A representa uma variável da população. Ao final do processo de recombinação a população tem um de seus indivíduos atualizado com o braço *a* do outro cromossomo (ASSIS 2014).

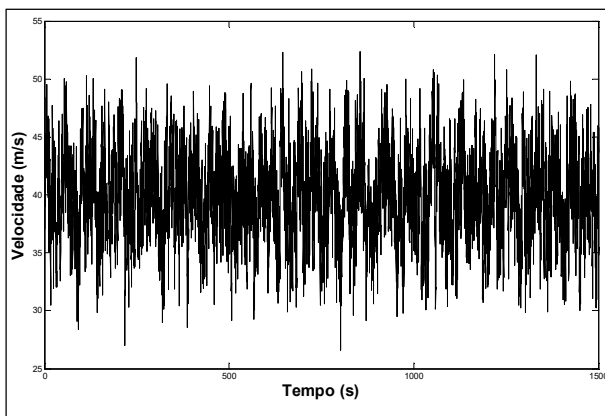


#### 4. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Estruturas altas e esbeltas tendem a oscilar demasiadamente quando solicitadas por ações de natureza dinâmica, por exemplo, ação dinâmica do vento. O vento é uma ação de natureza dinâmica, do qual possui uma flutuação entorno de sua velocidade média, como descrito na Sessão 3.3.

Para gerar as flutuações do vento, o presente trabalho utilizou o espectro de potência de Kaimal, gerou-se o sinal com o tempo discretizado em  $\Delta t = 0,10s$ . Para manter a estabilidade do sinal, garantir a ergodicidade do mesmo, estimou-se que a flutuação deveria estender-se por 1500 s. A Figura 21 exibe uma série temporal da velocidade do vento.

Figura 21 – Velocidade turbulenta no topo da estrutura.



Fonte: autoria própria.

A flutuação do vento foi acrescida à parcela permanente do mesmo, considerando apenas a direção longitudinal à velocidade média do vento. Com isso, a velocidade total em cada instante de tempo é composta da parcela da velocidade média e outra parcela transiente, proveniente da flutuação do vento. A Equação 44 exibe a composição da velocidade para cada instante de tempo.

$$\mathbf{V}(\mathbf{z}, t) = \bar{\mathbf{V}}(\mathbf{z})\mathbf{i} + \mathbf{v}_x(\mathbf{z}, t)\mathbf{i} \quad (44)$$

As forças de arrasto, para cada instante de tempo, podem ser calculadas a partir da Equação 45 (BALENDRA, 1995),

$$\bar{\mathbf{F}}_d = \frac{1}{2} \rho_{ar} C_p A_d V^2 \quad (45)$$

onde  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar, estimada em 1,225 kg/m<sup>3</sup>, considerando o nível do mar a 15°C,  $A_d$  é a área de influência calculada através das dimensões da estrutura,  $C_p$  representa o coeficiente de escoamento da estrutura,  $V$  é a velocidade calculada no determinado ponto para cada instante de tempo.

Na natureza, a ação do vento não se inicia de forma súbita, a aplicação do vento na estrutura deve se dar de forma suave, a fim de evitar uma amplificação dinâmica inicial o sinal de vento foi suavizado por uma função arco-tangente. Também, descartaram-se os 20 segundos iniciais, com o intuito de avaliar apenas a parcela estacionária da resposta.

Assim como descrito na Sessão 3.3.5, o vento possui uma correlação espacial, o centro do turbilhão do vento atua também sobre sua vizinhança. O presente trabalho trata a correlação espacial entre os nós adjacentes de forma linear, conforme proposto por Riera e Ambrosini (1992).

A estrutura em análise é discretizada em barras, conforme Sessão 3.2, segundo método dos elementos finitos, possibilitando formular a matriz de massa e de rigidez da estrutura, matriz  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{K}$ , respectivamente.

No entanto, as estruturas possuem um amortecimento natural, responsáveis por dissipar parte da energia de oscilação. Para formular a matriz de amortecimento  $\mathbf{C}$ , utilizou-se o método de *Rayleigh*, observou-se que grande parte dos estudos sobre análise dinâmica utiliza razão de amortecimento próximo a 0,01, a fim de tornar a estrutura sensível à ação dinâmica, o presente trabalho adota o mesmo valor de  $\xi = 0,01$ .

O método de *Rayleigh* formula a matriz de amortecimento  $\mathbf{C}$  como sendo uma parcela das matrizes de massa  $\mathbf{M}$  e de rigidez  $\mathbf{K}$  da estrutura, como descrito na Equação 46,

$$\mathbf{C} = b_0 \mathbf{M} + b_1 \mathbf{K} \quad (46)$$

onde os parâmetros  $b_0$  e  $b_1$  podem ser definidos segundo as Equações 47 e 48,

$$b_0 = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi\omega_1 - \xi\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (47)$$

$$b_1 = \frac{2(\xi\omega_1 - \xi\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (48)$$

onde  $\omega_1$  e  $\omega_2$  são as duas frequências mais baixas calculadas.

Após a formulação da matriz de massa  $\mathbf{M}$  e matriz de rigidez  $\mathbf{K}$ , através do método de elementos finitos, e a matriz de amortecimento  $\mathbf{C}$  através do método de *Rayleigh*, pode-se utilizar a integração numérica de Newmark (descrito na Sessão 3.2.6) para obter-se a resposta da estrutura ao longo do tempo. Considerando que  $\mathbf{F}$  é a força excitante do vento, formula-se a equação de equilíbrio do problema dinâmico, Equação 49.

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\vec{x}}(t) + \mathbf{K}\vec{x}(t) = \vec{\mathbf{F}}(t) \quad (49)$$

Os parâmetros de ajustes do método de Newmark são determinados como  $\alpha = 1/2$  e  $\eta = 1/4$ , valores propostos por Bathe (1996). Desta forma, pode-se determinar a aceleração  $\ddot{\vec{x}}$ , a velocidade  $\dot{\vec{x}}$  e o deslocamento  $\vec{x}$  da estrutura em cada instante de tempo.

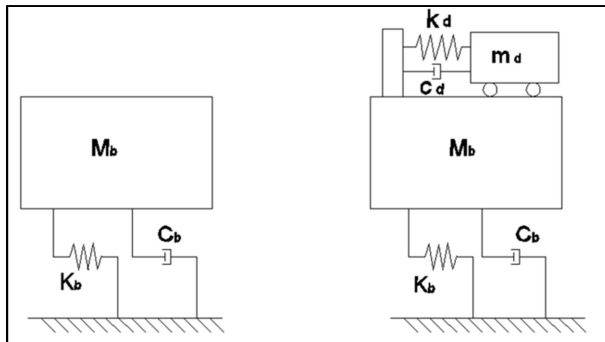
Como descrito na Sessão 3.1, pode-se utilizar mecanismos de controle estrutural para atenuar os deslocamentos excessivos da estrutura submetida à ação dinâmica do vento. O presente trabalho fará uso de atenuadores dinâmicos sintonizados – ADS. Na Sessão 4.1 será apresentado o método de Warburton (1982) para dimensionar ADS simples e serão utilizados os conceitos da Sessão 3.4 para dimensionar numericamente ADS simples e múltiplos ADS.

## 4.1. METODOLOGIA PROPOSTA

### 4.1.1. Dimensionamento de ADS simples

Warburton (1982) elaborou equações analíticas para o dimensionamento de ADS simples. Estas equações foram elaboradas para dimensionar ADS simples em modelos com um grau de liberdade submetidas à excitação do tipo *white noise* (ruído branco). A Figura 22 ilustra a aplicação do ADS simples em um modelo com um grau de liberdade.

Figura 22 – Modelo com grau de liberdade e ADS instalado.



Fonte: autoria própria.

De acordo com Warburton (1982), o ADS pode ser dimensionado com referência à massa da estrutura  $M_b$  e a relação entre a frequência do ADS  $\omega_d$  e a frequência da estrutura  $\omega_b$ , Equação 50,

$$\mu_{ref} = \frac{m_d}{M_b}; \quad f_{opt} = \frac{\omega_d}{\omega_b} \quad (50)$$

onde  $\mu_{ref}$  é a relação entre a massa do ADS  $m_d$  e a massa da estrutura  $M_b$ ,  $f_{opt}$  é a relação entre a frequência do ADS  $\omega_d$  e a frequência da estrutura  $\omega_b$ . Logo, a rigidez  $k_d$  e o amortecimento  $c_d$  do ADS serão expressos em relação à  $\mu_{ref}$  e  $f_{opt}$ , como pode ser visto nas Equações 51, 52, 53 e 54.

$$f_{\text{opt}} = \frac{\omega_d}{\omega_b} = \sqrt{\frac{\mu_{\text{ref}}+2}{2(\mu_{\text{ref}}+1)^2}} \quad (51)$$

$$\xi_{\text{aopt}} = \sqrt{\frac{\mu_{\text{ref}}(3\mu_{\text{ref}}+4)}{8(\mu_{\text{ref}}+1)(\mu_{\text{ref}}+2)}} \quad (52)$$

$$(c_d)_{\text{opt}} = 2\mu_{\text{ref}}\xi_{\text{aopt}}f_{\text{opt}}M_b\omega_b \quad (53)$$

$$(k_d)_{\text{opt}} = \mu_{\text{ref}}f_{\text{opt}}^2M_b\omega_b^2 \quad (54)$$

No entanto a estrutura que será analisada neste trabalho, inicialmente não possui apenas um grau de liberdade, com isso será aplicado o esquema de Rana e Soong (1998), do qual visa formular uma estrutura de um grau de liberdade equivalente à estrutura com múltiplos graus de liberdade. Para isso, o primeiro modo de vibração da estrutura  $\bar{\Phi}_{(1)}$  é normalizado com valor unitário no mesmo local onde se deseja aplicar o ADS (no presente trabalho, todos os ADS serão instalados no topo da estrutura). Assim, pré e pós-multiplicando a matriz de massa  $\mathbf{M}$  e de rigidez  $\mathbf{K}$  pelo primeiro modo de vibração  $\bar{\Phi}_{(1)}$ , obtém-se  $M_b$  e  $K_b$ , demonstrado nas Equações 55 e 56,

$$\bar{\Phi}_{(1)}^T \mathbf{M} \bar{\Phi}_{(1)} = M_b \quad (55)$$

$$\bar{\Phi}_{(1)}^T \mathbf{K} \bar{\Phi}_{(1)} = K_b \quad (56)$$

onde  $M_b$  e  $K_b$  representam a massa e a rigidez equivalente da estrutura com um grau de liberdade, possibilitando aplicar as expressões analíticas de Warburton (1982) para dimensionar o ADS simples.

Após dimensionar o ADS, o mesmo deve ser adicionado à estrutura em análise discretizada por MEF, a fim de avaliar desempenho do mesmo no controle estrutural. Assim a massa  $m_d$ , a rigidez  $k_d$  e o amortecedor  $c_d$  do ADS serão introduzidos à matriz de massa  $\mathbf{M}$ , matriz de rigidez  $\mathbf{K}$  e a matriz de amortecimento  $\mathbf{C}$  de acordo com as Equações 57, 58 e 59.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_d \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_{n-1} + k_d & -k_d \\ & & & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + k_2 & -c_2 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & c_{n-1} + c_d & -c_d \\ & & & -c_d & c_d \end{bmatrix} \quad (59)$$

O presente trabalho visa a aplicação de algoritmos numéricos para o dimensionamento de ADS simples. Desta forma, serão utilizados os algoritmos heurísticos BSA e *Harmony Search*, tendo como objetivo minimizar o desvio padrão da resposta da estrutura, em termos dos deslocamentos medidos no topo. As variáveis de projeto são as constantes de rigidez e amortecimento. A massa do ADS simples será fixada como uma proporção da massa total da estrutura.

Inicialmente o problema proposto visa determinar as variáveis de projeto  $k_d$  e  $c_d$  ( $k_d, c_d \in \mathfrak{R}$ ), estas variáveis podem ser agrupadas no vetor  $\mathbf{x} = [k_d, c_d]$ . O problema de otimização pode ser definido da seguinte forma:

|             |  |
|-------------|--|
| Encontrar   | $\mathbf{x} = [k_d, c_d]$ .                |
| Minimização | $f(\mathbf{x}) = \sigma(u_{400m})$         |
| Restrições  | $G1 = k_d^{\min} \leq k_d \leq k_d^{\max}$ |
|             | $G2 = c_d^{\min} \leq c_d \leq c_d^{\max}$ |
|             | $G3 = \mu \times M_{tot}$                  |

onde  $\mathbf{x}$  é o vetor a ser encontrado,  $f(\mathbf{x})$  é a função objetivo do problema de otimização. A função  $f(\mathbf{x})$  determinará  $\mathbf{x}$  para que  $f$  obtenha o menor valor. O parâmetro  $f(\mathbf{x})$  estará submetido às restrições G1, G2, G3,  $k_d^{min}$  e  $k_d^{max}$  são os limites inferiores e superiores para o coeficiente de rigidez do ADS;  $c_d^{min}$  e  $c_d^{max}$  são os limites inferiores e superiores para o coeficiente de amortecimento do ADS simples; a massa do ADS instalado no topo é restrita em  $\mu \times M_{tot}$ , onde  $\mu$  representa uma porcentagem da massa total da estrutura.

Para aplicar-se ADS simples na estrutura em análise, a matriz de massa, rigidez e amortecimento devem ser alteradas de acordo com as Equações 57, 58 e 59.

#### 4.1.2. Dimensionamento de múltiplos ADS

O presente trabalho visa dimensionar múltiplos ADS e determinar o número ótimo de ADS. Serão utilizados os mesmos algoritmos do dimensionamento de ADS simples. As variáveis de projeto são as constantes de rigidez  $k_d$  e amortecimento  $c_d$  de cada ADS, bem como o número de ADS  $n$  ADS.

Diferentemente de estudos anteriores, em que as constantes  $k_d$  e  $c_d$  ( $k_d, c_d \in \mathfrak{R}$ ) são obtidas para uma configuração pré-definida de ADS (a localização e o número de equipamentos deveriam ser pré-fixados *a priori*), no presente trabalho a otimização parte de uma configuração universal (estrutura + um número máximo de ADS desejado), buscando também o número de ADS que leva ao mínimo da função objetivo.

De fato, a ideia do esquema proposto é escolher o número ótimo de ADS a partir de uma configuração universal pré-definida, descartando os ADS desnecessários. Simultaneamente, o algoritmo determina os valores ótimos das constantes  $k_d$  e  $c_d$ . Cabe ressaltar que a variável “número de atenuadores” somente pode assumir números inteiros ( $n$  ADS  $\in \mathbb{Z}$ ). Assim, o número de atenuadores é uma variável discreta do problema, tornando-o um problema de otimização com variáveis mistas.

Assim como a organização anterior do vetor de busca, o mesmo pode ser feito para múltiplos ADS, e o vetor de busca pode ser reescrito como  $\mathbf{x} = [k_d, c_d, n \text{ ADS}]$ . Assim, o problema de otimização pode ser definido da seguinte forma:

|             |  |
|-------------|--|
| Encontrar   | $\mathbf{x} = [k_d, c_d, n \text{ ADS}]$ .   |
| Minimização | $f(\mathbf{x}) = \sigma(u_{400m})$   |
| Restrições  | $G1 = k_d^{\min} \leq k_d \leq k_d^{\max}$<br>$G2 = c_d^{\min} \leq c_d \leq c_d^{\max}$<br>$G3 = \sum \text{massa } n \text{ ADS} = \mu \times M_{tot}$<br>$G4 = n^{\min} \text{ ADS} \leq n \text{ ADS} \leq n^{\max} \text{ ADS}$ |

Para o problema de múltiplos ADS, a restrição G3 necessitou ser alterada. De modo que a quantidade de ADS varia em cada iteração, é necessário que a massa total do conjunto de ADS seja constante. Tendo em vista que a variável  $n \text{ ADS}$  foi introduzida ao vetor de busca, necessitou-se inserir a restrição G4, que visa limitar um valor mínimo  $n^{\min} \text{ ADS}$  e máximo  $n^{\max} \text{ ADS}$  para a quantidade de ADS.

O problema de múltiplos ADS necessita que a matriz de massa  $\mathbf{M}$ , rigidez  $\mathbf{K}$  e amortecimento  $\mathbf{C}$  sejam alteradas, para que computem a existência dos  $n \text{ ADS}$ , de acordo com as Equações 60, 61 e 62.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{d_{n-1}} & m_{d_n} \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_{n-1} + \sum k_{d_n \text{ ADS}} & -k_{d_1} & \dots & -k_{d_n} \\ 0 & 0 & \dots & -k_{d_1} & k_{d_1} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -k_{d_n} & \dots & \dots & k_{d_n} \end{bmatrix} \quad (61)$$



$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & c_{n-1} + \sum c_{d_n ADS} & -c_{d_1} & \dots & -c_{d_n} \\ 0 & 0 & \dots & -c_{d_1} & c_{d_1} & \dots & \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & -c_{d_n} & \dots & \dots & c_{d_n} \end{bmatrix} \quad (62)$$

A seguir, a Sessão 4.2 aplica os conceitos formulados no Capítulo 3, junto à metodologia proposta na Sessão 4.1. O problema foi estudado por Ankireddi e Yang (1996) visando avaliar a interferência da massa do ADS no controle estrutural.

O presente trabalho analisará a interferência da massa do ADS simples no controle estrutural, utilizando o dimensionamento analítico de Warburton (1982), assim como Ankireddi e Yang (1996). Além disso, irá analisar a interferência do aumento da massa do ADS simples dimensionado via métodos numéricos e a interferência do aumento da massa de múltiplos ADS.

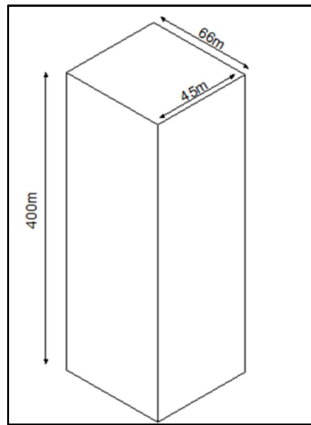
Ao final, será analisada a performance de cada método de dimensionamento de ADS, comparando o dimensionamento analítico de ADS simples (WARBURTON, 1982) com o dimensionamento numérico de ADS simples e de múltiplos ADS.

## 4.2. ESTUDO DE CASO

### 4.2.1. Estrutura em análise

A estrutura de análise foi estudada anteriormente por Warburton (1982) e Ankiredd e Yang (1996), possui dimensões de 66 m de largura e 45 m de profundidade, contendo 400 m de altura, o croqui da estrutura pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Estrutura em estudo.

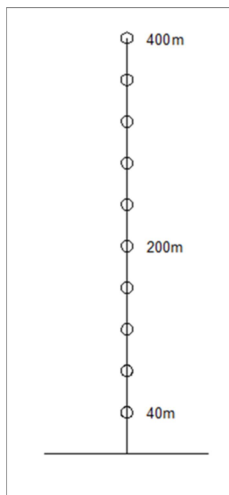


Fonte: adaptado de Ankireddi e Yang (1996)

O peso específico da estrutura é  $w = 1500 \text{ N/m}$  distribuído uniformemente ao longo de suas dimensões, módulo de elasticidade de  $6,00 \times 10^2 \text{ Mpa}$ . O peso específico e o módulo de elasticidade são valores hipotéticos, as propriedades do material não possuem rigor físico, os valores são os mesmos utilizados nos estudo anteriores. A estrutura podendo ser vista como um mastro de grandes dimensões.

Utilizando a metodologia do Capítulo 4, esta estrutura foi discretizada via MEF com dez elementos de barra, engastado na base e livre no topo, de acordo com o trabalho de Ankireddi e Yang (1996), como ilustra a Figura 24. Assim, possibilitou-se determinas a matriz de massa **M** e de rigidez **K** da estrutura.

Figura 24 – Discretização da massa da estrutura em análise.



Fonte: autoria própria.

Desta forma, pode-se calcular a frequência natural da estrutura, a Tabela 3 exibe as cinco frequências naturais mais baixas.

Tabela 3 – As cinco frequências naturais mais baixas da estrutura

|                      | <b>Hz</b> | <b>rad/s</b> |
|----------------------|-----------|--------------|
| <b>1<sup>a</sup></b> | 0,0900    | 0,5655       |
| <b>2<sup>a</sup></b> | 1,5798    | 9,9261       |
| <b>3<sup>a</sup></b> | 5,1291    | 32,2269      |
| <b>4<sup>a</sup></b> | 10,7809   | 67,7386      |
| <b>5<sup>a</sup></b> | 18,6753   | 117,3401     |

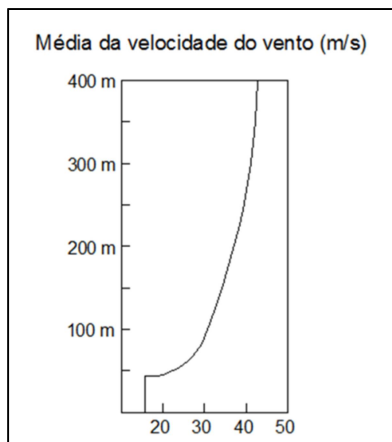
Fonte: autoria própria.

De acordo com Ankireddi e Yang (1996) a estrutura em estudo possui razão de amortecimento  $\xi = 0,01$ , utilizando o método de

*Rayleigh* descrito no Capítulo 4, pode-se formular a matriz de amortecimento  $C$ .

Considerou-se que esta estrutura está localizada em um centro de grande cidade, assim a rugosidade do terreno  $z_o = 0,65$  m. Considerou-se um coeficiente de escoamento  $C_p = 0,55$  segundo Balendra (1993). A velocidade do vento a 10 m de altura foi extraída do gráfico de velocidade média,  $V_o = 15$  m/s, exposta no trabalho de Ankireddi e Yang (1996), exibido na Figura 25.

Figura 25 – Perfil velocidade média do vento.



Fonte: adaptado de Ankireddi e Yang (1996)

De acordo com a metodologia proposta no Capítulo 4, foram geradas três séries temporais com 1500 s de duração e aplicadas na estrutura nas cotas 20, 200 e 400 m, dentro dos limites de escala de turbulência indicado por Blessmann (1995), os nós intermediários foram interpolados linearmente, como mencionado anteriormente.

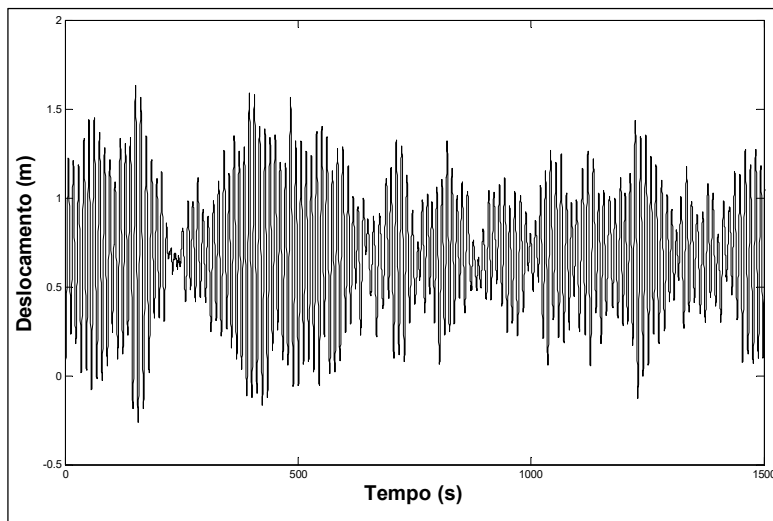
Formulando-se as forças de aplicação na estrutura  $F$  para cada instante de tempo, utilizando a massa  $M$ , de rigidez  $K$  e de amortecimento  $C$ , pode-se calcular a resposta da estrutura de acordo com o método de Newmark, exposto no Capítulo 3. A sessão a seguir exhibe os resultados da estrutura sem controle.

#### 4.2.2. Cálculo da resposta sem controle

Como a frequência da estrutura e a frequência de excitação do vento estão muito próximas, pode-se dizer que esta estrutura é sensível à ação dinâmica do vento. Desta forma, a mesma tende a oscilar demasiadamente em torno do seu deslocamento médio.

O deslocamento horizontal médio no topo da estrutura foi de 0,680 m (representa o deslocamento estático da estrutura; se não houvesse parcela dinâmica na aplicação da velocidade, seria o deslocamento máximo da estrutura), entretanto a parcela turbulenta do vento faz com que o deslocamento máximo do topo da estrutura atinja 1,589 m, enquanto o desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo foi 0,340 m. Na Figura 26 pode ser visto o gráfico dos deslocamentos do topo da estrutura ao longo do tempo.

Figura 26 – Resposta da estrutura sem controle.



Fonte: autoria própria.

A seguir, será aplicada a metodologia do Capítulo 4 no dimensionamento de ADS, inicialmente será avaliada a variação da

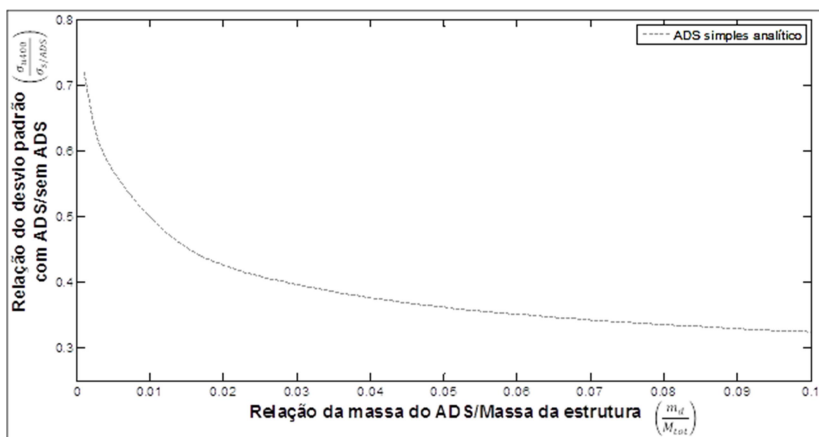
massa do ADS no desempenho do controle estrutural. Serão utilizados os métodos de dimensionamento analítico de Warburton (1982) e métodos numéricos via algoritmos de otimização.

#### 4.2.3. Análise da resposta com ADS simples – dimensionamento analítico

Nesta seção utiliza-se o método de dimensionamento analítico de ADS simples, segundo Warburton (1982), exposto no Capítulo 4. O processo de dimensionamento analítico visa determinar os parâmetros  $k_d$  e  $c_d$  de ADS simples para uma estrutura reduzida à um grau de liberdade. Após, o ADS simples calculado é aplicado no topo da estrutura discretizada por MEF e seu desempenho é avaliado.

A Figura 27 apresenta o desempenho de cada ADS simples estudado. Cada ADS tem sua massa variando em passos fixos, o eixo  $x$  corresponde à variação da massa do ADS em proporção à massa total da estrutura, variando em passos constantes de 0,001, entre os intervalos de 0,001 até 0.1. O eixo  $y$  corresponde ao desempenho do ADS, desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura com ADS em razão ao desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura sem controle.

Figura 27 – Gráfico dos resultados de cada ADS simples - dimensionamento analítico.



Fonte: autoria própria.

Observa-se que o aumento da massa do ADS tende a um aumento da eficiência do mesmo, entretanto há uma acentuada eficiência entre as razões de massa de 0,001 até 0,04.

A seguir, será utilizado o dimensionamento numérico de ADS simples, avaliando-se a variação da massa do ADS no controle estrutural, assim como feito para as expressões analíticas.

#### 4.2.4. Análise da resposta com ADS simples – dimensionamento numérico

Nesta seção, examina-se os parâmetros ótimos  $k_d$  e  $c_d$  quando utiliza-se os algoritmos de otimização *Harmony Search* e BSA. Cabe salientar que, neste caso, o procedimento de otimização é feito sobre o exemplo discretizado por MEF, não havendo nenhuma simplificação em relação à excitação e a estrutura.

Considerando-se a metodologia do Capítulo 4, Sessão 4.1, primeiramente serão determinados os valores dos parâmetros ótimos ( $k_d$  e  $c_d$ ) de um ADS simples instalado no topo da estrutura, respeitando os limites das restrições, conforme abaixo.

$$G1 = 0 \leq k_d \leq 4 \times 10^9 \text{ N/m}$$

$$G2 = 0 \leq c_d \leq 1 \times 10^9 \text{ N.s/m}$$

$$G3 = m_d = \mu \times M_{tot} = \mu \times 1,8171 \times 10^8 \text{ kg}$$

Na restrição G3  $m_d$  é a massa do ADS simples instalado no topo e  $\mu$  é a relação entre a massa do ADS e a massa da estrutura em análise, os limites das restrições G1 e G2 são utilizados com base nos estudos de Hadi e Arfiad (1998).

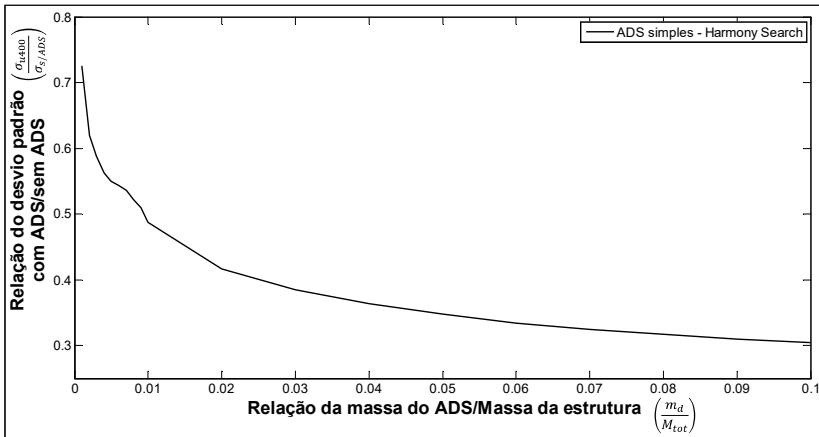
A otimização com o algoritmo *Harmony Search* possui os seguintes parâmetros de busca:

- Número de iterações = 10 000
- Memória harmônica = 10
- Taxa de utilização da memória = 0,8
- Taxa de improvisação = 0,3

Os valores dos parâmetros de busca foram determinados a partir de tentativa e erro, a fim de que o algoritmo não fique preso em mínimos locais.

A Figura 28 mostra o resultado do desvio padrão do deslocamento da estrutura medidos no topo em relação à variação da massa do ADS, dimensionado via *Harmony Search*. Na Figura 29, pode-se ver a sobreposição do gráfico com dimensionamento de ADS simples via método analítico (WARBURTON, 1982) com os resultados apresentados no gráfico da Figura 27.

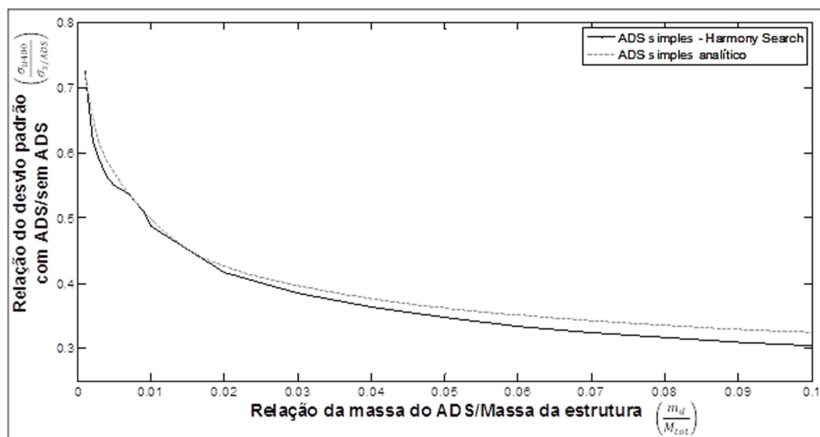
Figura 28 – Gráfico dos resultados para cada massa do ADS simples com otimização via algoritmo *Harmony Search*.



Fonte: autoria própria.



Figura 29 – Comparação entre os resultados do dimensionamento numérico para ADS simples com algoritmo *Harmony Search* e o dimensionamento analítico para ADS simples.



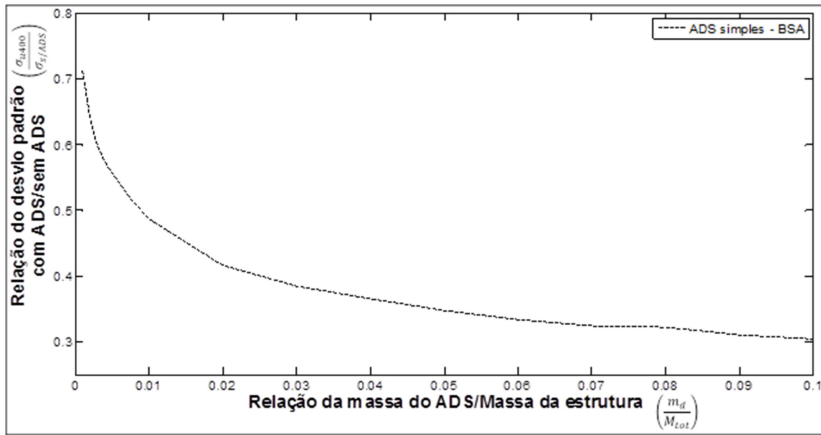
Fonte: autoria própria.

O mesmo processo de otimização também foi efetuado com o algoritmo BSA. Assim como a determinação dos parâmetros de entrada do algoritmo *Harmony Search*, os parâmetros de entrada do algoritmo BSA são descritos a seguir:

- Número de iterações = 10 000
- População = 8

O gráfico da Figura 30 exibe o resultado obtido com o dimensionamento numérico via BSA.

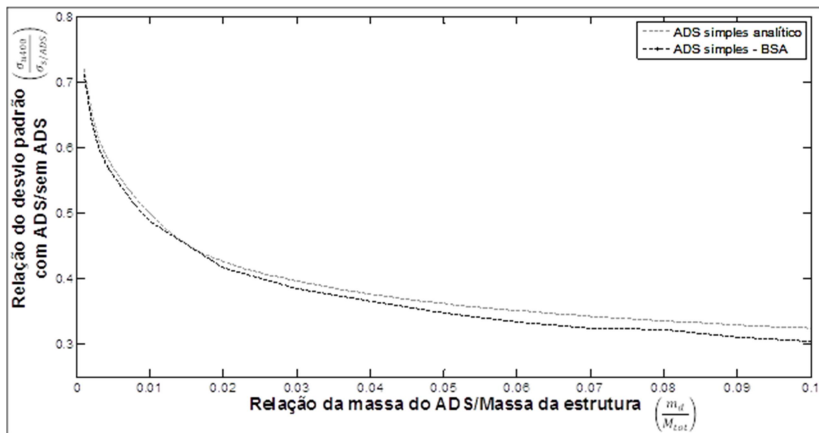
Figura 30 – Gráfico dos resultados para cada massa do ADS simples otimizando com o algoritmo BSA.



Fonte: autoria própria.

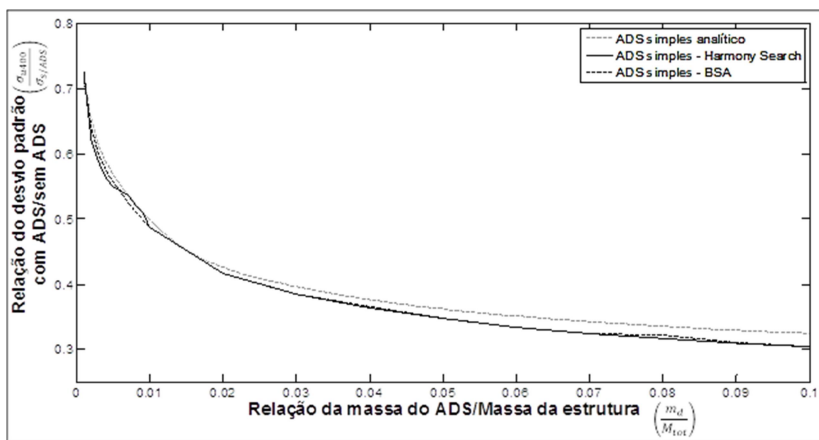
Para analisar comparativamente, a Figura 31 sobrepõe os gráficos da Figura 30 a Figura 27. A Figura 32 mostra a sobreposição os resultados com dimensionamento de ADS utilizando método analítico (WARBURTON, 1982) com os resultados obtidos para dimensionamento numérico com os algoritmos BSA e *Harmony Search*.

Figura 31 – Gráfico comparativo entre os resultados do ADS simples com dimensionamento analítico e os resultados do ADS simples otimizados com o BSA.



Fonte: autoria própria.

Figura 32 – Gráfico com os resultados do dimensionamento de ADS simples analítico, com resultados do ADS simples otimizado com BSA e os resultados do ADS simples otimizado com *Harmony Search*.



Fonte: autoria própria.

Observa-se que ambos os algoritmos numéricos obtêm resultados praticamente iguais para todo o domínio. Entre 0,001 e 0,03 da relação da massa do ADS os desempenhos do método analítico e dos numéricos mostraram-se relativamente iguais. Após a massa do ADS ultrapassar 3% da massa total da estrutura, o dimensionamento via métodos numéricos apresentaram resultados pouco melhores que o dimensionamento analítico.

#### 4.2.5. Análise da resposta com múltiplos ADS – dimensionamento numérico

Nesta seção avalia-se o método de otimização proposto no Capítulo 4 para múltiplos ADS. O processo otimizará os parâmetros  $k_d$  e  $c_d$  para cada ADS instalado no topo da estrutura, determinando simultaneamente a quantidade ótima de ADS, segundo as restrições descritas a seguir:

$$G1 = 0 \leq k_d \leq 4 \times 10^9 \text{N/m}$$

$$G2 = 0 \leq c_d \leq 1 \times 10^9 \text{N.s/m}$$

$$G3 = \sum m_d = \frac{\mu \times M_{\text{tot}}}{n \text{ ADS}} = \frac{\mu \times 1,71 \times 10^8 \text{ kg}}{n \text{ ADS}}$$

$$G4 = 1 \leq n \text{ ADS} \leq 10$$

Inicialmente, aplica-se o algoritmo *Harmony Search*. Os parâmetros de entrada do algoritmo são descritos a seguir:

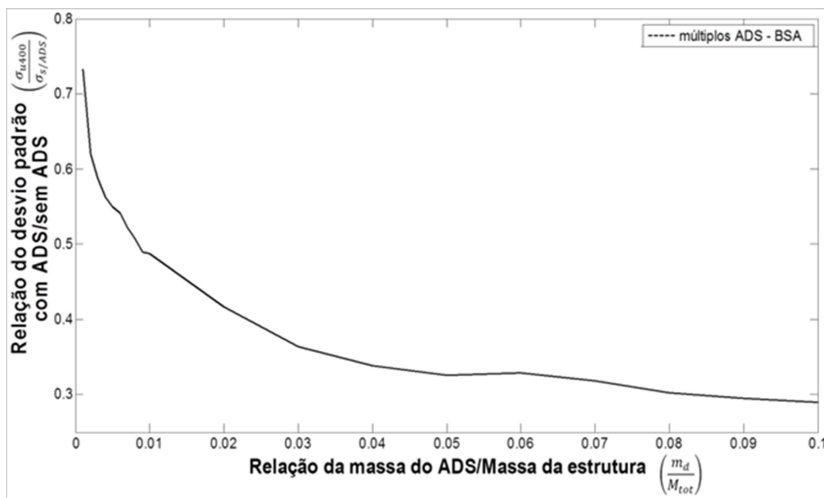
- Número de iterações = 30 000
- Memória harmônica = 12
- Taxa de utilização da memória = 0,8
- Taxa de improvisação = 0,3
- Taxa de exclusão de ADS = 0,3
- Número máximo de ADS = 20

Aumentou-se o número de iterações tendo em vista que o número de ADS foi introduzido às variáveis de busca do algoritmo, aumentando a complexidade do problema e tornando a busca substancialmente mais árdua.

Para a otimização com múltiplos ADS o algoritmo inicia-se com um número máximo de 20 ADS, ao longo da busca há uma probabilidade individual de 30% de exclusão do ADS, levando em consideração o grupo de melhores conjuntos de ADS já analisados.

A Figura 33 exibe o gráfico dos resultados encontrados com o algoritmo *Harmony Search*.

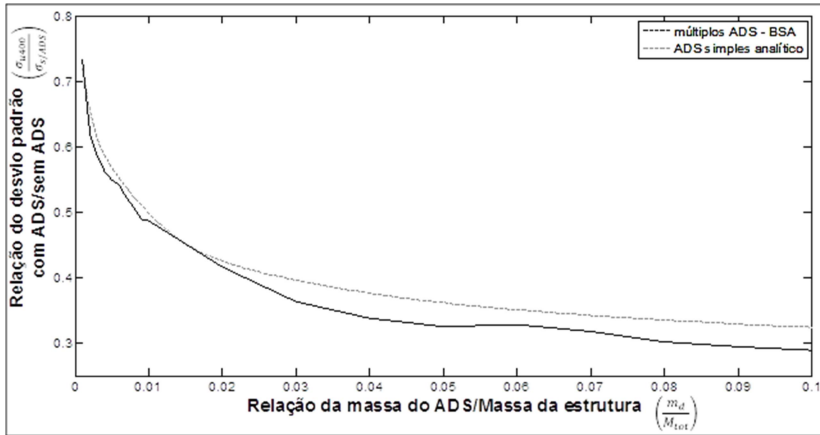
Figura 33 – Gráfico da resposta otimizada com *Harmony Search* para múltiplos ADS.



Fonte: autoria própria.

A Figura 34 mostra a sobreposição do gráfico otimizado com *Harmony Search* para múltiplos ADS e os resultados obtidos com ADS simples dimensionado analiticamente.

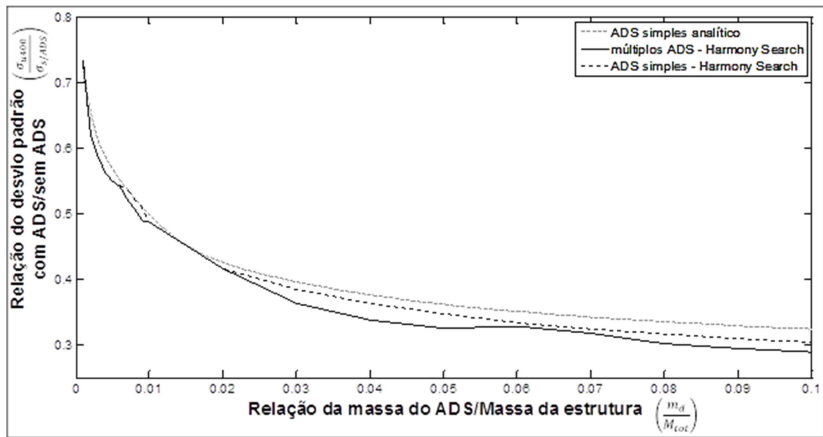
Figura 34 – Gráfico comparativo entre os resultados de ADS simples dimensionado analiticamente com os resultados de múltiplos ADS otimizados com o *Harmony Search*.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 35, pode ser visto o gráfico com os resultados do dimensionamento analítico de ADS sobreposto aos resultados obtidos com dimensionamento numericamente via *Harmony Search* e os resultados de múltiplos ADS dimensionados com *Harmony Search*.

Figura 35 – Gráfico comparativo entre os resultados do ADS simples com dimensionamento analítico, resultados do ADS simples com dimensionamento numérico com *Harmony Search* e os resultados de múltiplos ADS otimizados com *Harmony Search*.



Fonte: autoria própria.

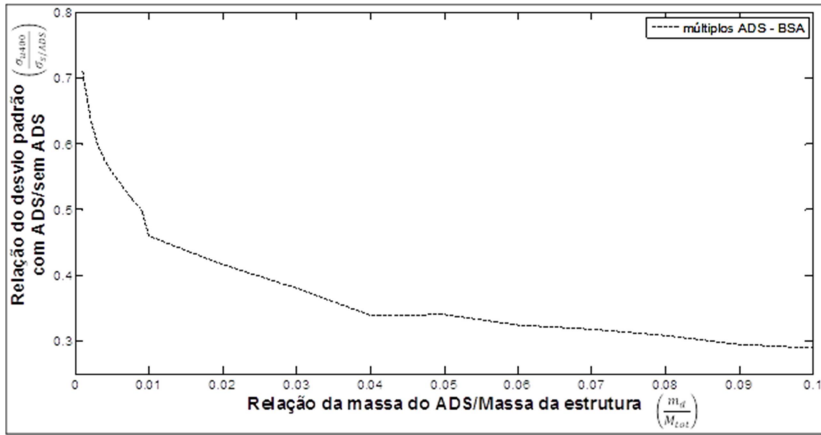
Similarmente ao trabalho feito com o algoritmo *Harmony Search*, será utilizado o algoritmo de otimização BSA. A seguir, podem ser vistos os parâmetros de busca do algoritmo.

- Número de iterações = 30 000
- População = 12
- Taxa de exclusão de ADS = 0,3
- Número máximo de ADS = 20

O parâmetro “taxa de exclusão de ADS” tem a mesma descrição vista no algoritmo *Harmony Search*.

A Figura 36 mostra o gráfico para cada massa do conjunto de ADS com a otimização dos parâmetros de cada ADS separadamente.

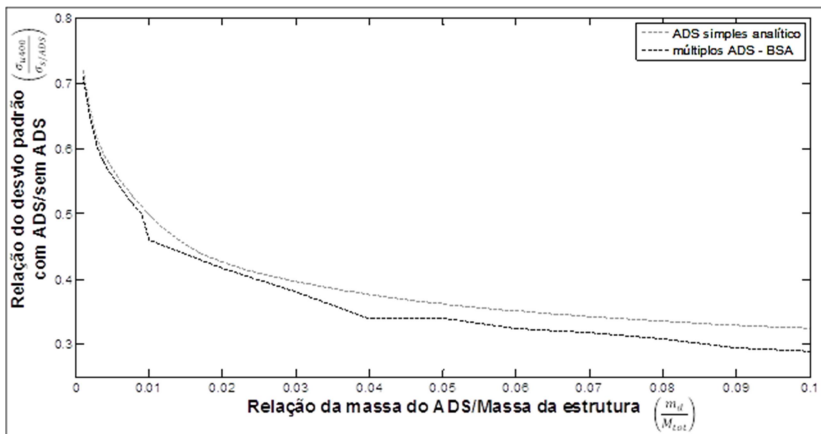
Figura 36 – Gráfico da resposta otimizada com BSA para múltiplos ADS.



Fonte: autoria própria.

A Figura 37 ilustra a resposta encontrada com o algoritmo BSA sobrepondo ao gráfico da resposta analítica da Figura 27.

Figura 37 – Gráfico comparativo entre os resultados de ADS simples dimensionado analiticamente e os resultados de múltiplos ADS otimizados via BSA.

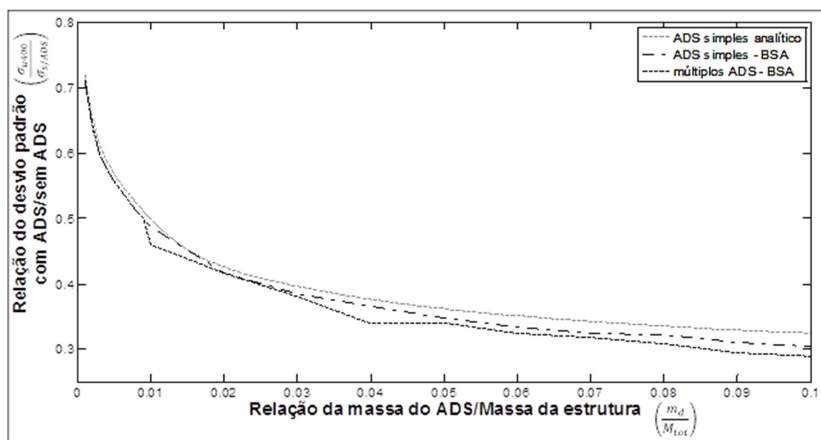


Fonte: autoria própria.



Na Figura 38, pode-se ver o gráfico com os resultados para o dimensionamento analítico do ADS, sobreposto aos gráficos do ADS simples dimensionado numericamente com BSA, e o gráfico para múltiplos ADS dimensionados com BSA.

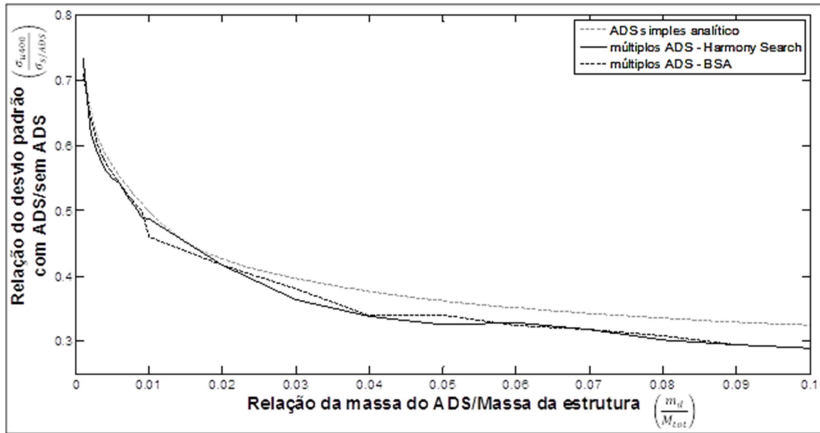
Figura 38 – Gráfico comparativo entre os resultados de ADS simples com dimensionamento analítico, resultados de ADS simples com dimensionamento numérico via BSA e os resultados de múltiplos ADS otimizados via BSA.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 39, pode ser visto o gráfico com os resultados para o dimensionamento analítico do ADS sobreposto aos gráficos de múltiplos ADS dimensionados numericamente com BSA e o gráfico para múltiplos ADS dimensionados com *Harmony Search*.

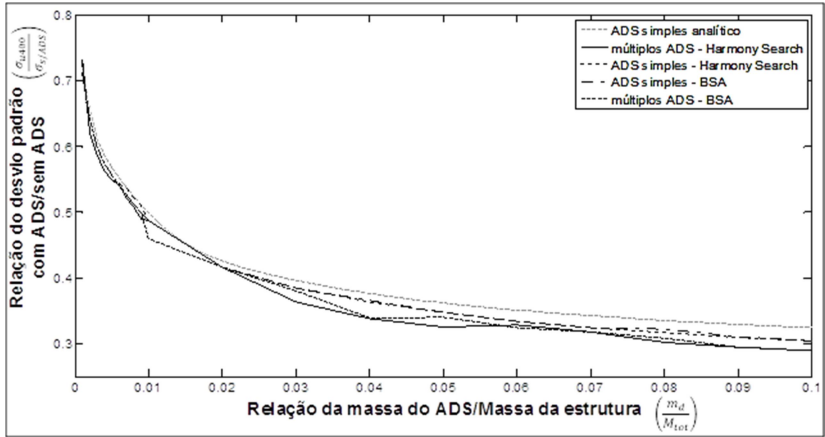
Figura 39 – Gráfico comparativo entre os resultados do dimensionamento analítico de ADS simples, resultados do dimensionamento de múltiplo ADS via BSA e os resultados de múltiplos ADS otimizados via *Harmony Search*.



Fonte: autoria própria.

A Figura 40 mostra a sobreposição dos resultados para ADS simples e múltiplos ADS dimensionados com o algoritmo BSA e *Harmony Search*, junto ao resultado obtido com a utilização de equações analíticas para o dimensionamento de ADS simples.

Figura 40 – Gráfico comparativo entre os resultados de ADS simples com dimensionamento analítico, resultados de ADS simples com dimensionamento numérico via BSA e *Harmony Search* e os resultados de múltiplos ADS otimizados via BSA e *Harmony Search*.



Fonte: autoria própria.

A Tabela 4 exibe a quantidade de ADS determinada de acordo com os algoritmos *Harmony Search* e BSA para cada porcentagem da massa do conjunto de ADS.

Tabela 4 – Quantidade ideal de ADS para cada massa utilizada no conjunto

|                     |                       | 1% | 2% | 3% | 4% | 5% | 6% | 7% | 8% | 9% |
|---------------------|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Quantidade e de ADS | <i>Harmony Search</i> | 1  | 1  | 3  | 4  | 5  | 2  | 3  | 4  | 4  |
|                     | BSA                   | 2  | 1  | 2  | 5  | 2  | 3  | 3  | 3  | 4  |

Fonte: autoria própria.

A Tabela 5 exibe os resultados do gráfico da Figura 40 para a variação da massa do ADS de 1% até 9% da massa total da estrutura; os

resultados representam a relação entre o desvio padrão da estrutura com controle e o desvio padrão da estrutura sem controle.

Tabela 5 – Desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura para ADS simples e múltiplos ADS, testados para variação da massa de 1% até 9%, para cada método de dimensionamento.

|             |            | 1%    | 2%    | 3%    | 4%    | 5%    | 6%    | 7%    | 8%    | 9%    |
|-------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ADS simples | Ana-lítico | 0,170 | 0,145 | 0,135 | 0,129 | 0,123 | 0,120 | 0,117 | 0,114 | 0,112 |
|             | HS         | 0,166 | 0,141 | 0,131 | 0,124 | 0,118 | 0,114 | 0,110 | 0,108 | 0,105 |
|             | BSA        | 0,166 | 0,141 | 0,131 | 0,124 | 0,118 | 0,110 | 0,111 | 0,110 | 0,106 |
| n ADS       | HS         | 0,166 | 0,142 | 0,123 | 0,115 | 0,111 | 0,112 | 0,108 | 0,103 | 0,100 |
|             | BSA        | 0,156 | 0,141 | 0,130 | 0,116 | 0,116 | 0,110 | 0,108 | 0,105 | 0,100 |

Fonte: autoria própria.

Através dos gráficos vistos anteriormente e da Tabela 4, conclui-se que os algoritmos de otimização apresentam certa instabilidade na busca do mínimo global entre os intervalos 0,001 e 0,02. Após 0,02 o algoritmo *Harmony Search* apresentou resultados melhores que o algoritmo BSA, para múltiplos ADS. Concluindo que o algoritmo de otimização BSA se manteve preso em mínimos locais.

Quando a massa do ADS foi aumentada para 6% da massa da estrutura, observa-se que o desempenho do ADS não melhorou, mesmo que a massa do ADS tenha aumentado, indo contra ao que foi visto no desempenho do ADS simples, o desempenho do mesmo piorou em relação ao ADS com massa de 5%. De modo geral, o aumento da massa dos ADS simples resulta em um ganho de desempenho no controle estrutural, para utilização de múltiplos ADS conclui-se que esta hipótese não se aplica. Desta forma, o dimensionamento de múltiplos ADS merece um cuidado adicional em relação à utilização de ADS simples.

A seguir, a estrutura em estudo será controlada com a utilização de ADS, simples e múltiplos, fixando a massa desse em 3% da massa total da estrutura. Utilizar-se-ão dos métodos numéricos para dimensionamento de ADS simples e múltiplos ADS e do método analítico para dimensionamento de ADS simples

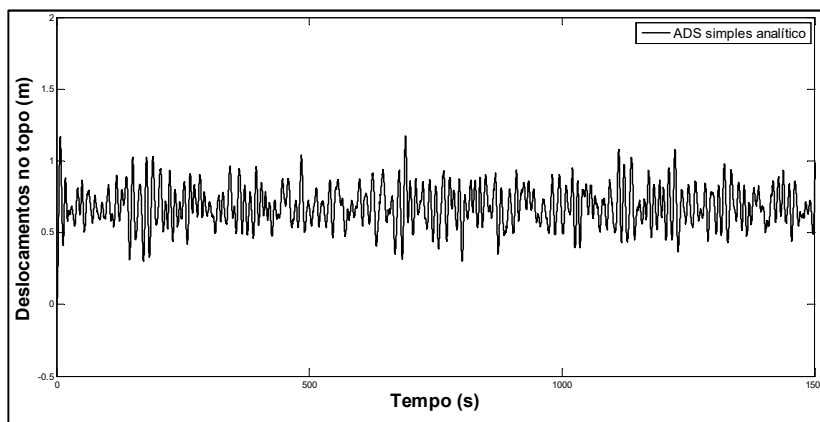
#### 4.2.6. Resposta ótima da estrutura com ADS simples

Hadi e Arfiad (1998) e Mohebbi (2012) sugerem que a massa do ADS não ultrapasse 3% da massa da estrutura, por limitações executivas. Assim, a massa do ADS simples será fixada em 3% da massa total da estrutura, como denota a Equação 63.

$$m_d = \mu \times M_{\text{total}} = 0,03 \times 1,817 \times 10^8 \text{ kg} = 5,45 \times 10^6 \text{ kg} \quad (63)$$

Com a utilização das equações analíticas de Warburton (1982) para dimensionamento de ADS simples, fixando a massa em 3% da massa da estrutura, o dimensionamento resultou  $k_d = 1,4733 \times 10^6 \text{ N/m}$  e  $c_d = 9,467 \times 10^5 \text{ N.s/m}$ . A Figura 41 exibe a resposta no tempo dos deslocamentos medidos no topo da estrutura com ADS simples dimensionado analiticamente.

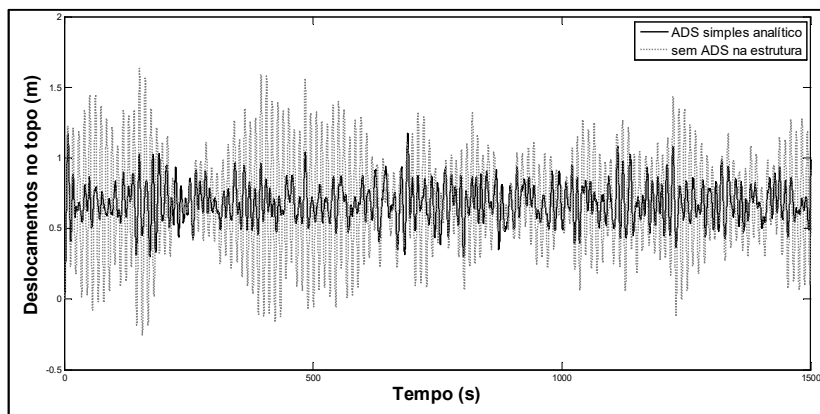
Figura 41 – Resposta dos deslocamentos no topo da estrutura ao longo do tempo, com ADS simples dimensionado analiticamente.



Fonte: autoria própria.

A Figura 42 exibe a sobreposição o gráfico da Figura 41 com a estrutura sem ADS.

Figura 42 – Deslocamentos medidos no topo da estrutura com ADS simples dimensionado analiticamente sobreposto com a resposta sem ADS.



Fonte: autoria própria.

O ADS simples calculado analiticamente possui frequência  $\omega_d = 0,5199 \text{ rad/s} = 0,0827 \text{ Hz}$ . Com a instalação do ADS, a estrutura resultou em um deslocamento máximo  $u_{\max} = 1,173 \text{ m}$ , representando uma redução de 26,19% em relação ao deslocamento máximo da estrutura sem ADS, desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura  $\sigma_{u400} = 0,135 \text{ m}$ , representando uma redução de 60,30% em relação ao desvio padrão da estrutura sem ADS. Na Tabela 6, podem ser vistos os resultados da estrutura sem controle e com implantação de ADS simples dimensionados analiticamente.

Tabela 6 – Resultados da análise da estrutura sem ADS e com ADS simples calculado analiticamente.

|                             | Sem ADS | ADS simples analítico |        |
|-----------------------------|---------|-----------------------|--------|
| $\sigma_{u400} \text{ (m)}$ | 0,340   | 0,135                 | 60,30% |
| $u_{\max} \text{ (m)}$      | 1,589   | 1,173                 | 26,19% |

Fonte: autoria própria.

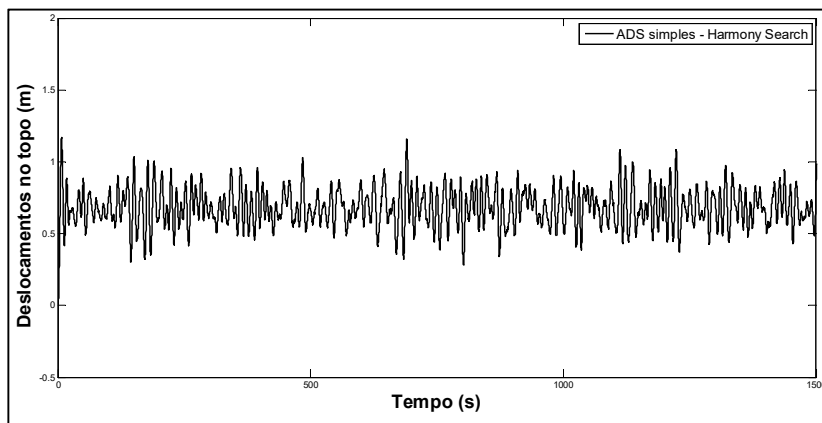
O dimensionamento numérico será realizado apenas com o algoritmo *Hamorny Search*, visto que o algoritmo BSA apresentou

resultados piores, prendendo-se em mínimos locais durante a busca. A massa do ADS é fixada em 3% da massa da estrutura,  $m_d = 5,45 \times 10^6$  kg, a mesma massa do dimensionamento analítico. Os parâmetros de otimização do algoritmo *Harmony Search* são determinados a seguir:

- Número de iterações = 18 000
- Memória harmônica = 12
- Taxa de utilização da memória = 0,8
- Taxa de improvisação = 0,3

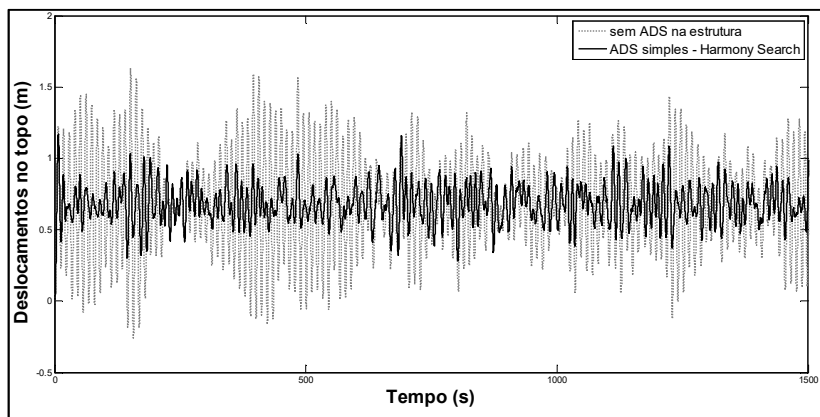
A otimização resultou nos parâmetros ótimos  $k_d = 1,4157 \times 10^6$  N/m e  $c_d = 8,883 \times 10^5$  N.s/m, tal que o valor do desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura seja o mínimo. A Figura 43 mostra o resultado da análise ao longo do tempo para a estrutura com ADS simples dimensionado com *Harmony Search*, a Figura 44 sobrepõe os gráficos com e sem a implantação de ADS, para o dimensionamento numérico com *Harmony Search*.

Figura 43 – Gráfico da resposta dos deslocamentos medidos no topo da estrutura com ADS simples calculado numericamente via algoritmo *Harmony Search*.



Fonte: autoria própria.

Figura 44 – Gráficos sobrepostos da estrutura com ADS simples dimensionados numericamente com *Harmony Search* e sem controle.



Fonte: autoria própria.

O ADS simples calculado via método numérico com o algoritmo *Harmony Search* possui frequência  $\omega_d = 0,5096 \text{ rad/s} = 0,0811 \text{ Hz}$ , durante o tempo de análise a estrutura resultou em um deslocamento máximo  $u_{\max} = 1,159 \text{ m}$ , representando uma redução de 27,02% em relação ao deslocamento máximo da estrutura sem ADS, desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura  $\sigma_{u400} = 0,131 \text{ m}$ , redução de 61,47% de redução em relação ao desvio padrão da estrutura sem controle. A Tabela 7 agrupa os resultados obtidos.

Tabela 7 – Resultados da análise da estrutura sem controle, com ADS simples calculado via método analítico e ADS simples calculado numericamente via *Harmony Search*

|                             | Sem ADS | ADS simples analítico |         | ADS simples – <i>Harmony Search</i> |         |
|-----------------------------|---------|-----------------------|---------|-------------------------------------|---------|
|                             |         |                       | Redução |                                     | Redução |
| $\sigma_{u400} \text{ (m)}$ | 0,340   | 0,135                 | 60,30%  | 0,131                               | 61,47   |
| $u_{\max} \text{ (m)}$      | 1,589   | 1,173                 | 26,19%  | 1,159                               | 27,02%  |

Fonte: autoria própria.



Nota-se que a utilização de ADS simples, quando bem dimensionados, possui poder de absorção do deslocamento máximo na ordem de 25%, o controle resultou na atenuação da oscilação em até 61,47%. Observa-se que as equações analíticas são suficientes para dimensionar ADS simples em estruturas sujeitas à ação dinâmica do vento. Mesmo que a otimização numérica tenha considerado um modelo mais refinado, os ganhos no dimensionamento numérico não foram tão significativos, em relação do dimensionamento numérico.

A seguir, a estrutura será analisada na linha do tempo, com utilização de múltiplos ADS dimensionados numericamente.

#### 4.2.7. Resposta ótima da estrutura com múltiplos ADS

Para reduzir a oscilação da estrutura é possível instalar múltiplos ADS no topo da estrutura. Similarmente à análise com ADS simples, a otimização segue as mesmas restrições propostas por Hadi e Arfiad (1998), no entanto. Assim, o somatório da massa do conjunto de ADS não deve ultrapassar 3% da massa total da estrutura, conforme Equação 64.

$$\sum m_d = \frac{\mu \times M_{\text{total}}}{n \text{ ADS}} = \frac{0,03 \times 1,8171 \times 10^8 \text{ kg}}{n \text{ ADS}} = \frac{5,450}{n \text{ ADS}} \times 10^6 \text{ kg.} \quad (64)$$

Com isto, o algoritmo *Harmony Search* determinará os parâmetros  $k_d$  e  $c_d$  que minimize o desvio padrão do deslocamento no topo da estrutura, sujeito aos parâmetros de entrada a seguir:

- Número de iterações = 30 000
- Memória harmônica = 12
- Taxa de utilização da memória = 0,8
- Taxa de improvisação = 0,3
- Número máximo de ADS = 20
- Taxa de exclusão de ADS = 0,3

O dimensionamento de múltiplos ADS com o algoritmo BSA não será utilizado nesta sessão, os resultados com este algoritmo ficaram presos em mínimos locais, como mencionado anteriormente.

O dimensionamento de múltiplos ADS determinou que são necessários três ADS para que a estrutura obtenha o melhor desempenho

no controle estrutural, a Tabela 8 exibe os valores ótimos para os parâmetros  $k_d$  e  $c_d$  de cada ADS.

Tabela 8 – Parâmetro dos múltiplos ADS dimensionados

| ADS | $k_d(N/m) \times 10^5$ | $c_d(N.s/m) \times 10^5$ |
|-----|------------------------|--------------------------|
| 1   | 3,3443                 | 0,7141                   |
| 2   | 4,6140                 | 0,8103                   |
| 3   | 6,7704                 | 1,7111                   |

Fonte: autoria própria.

O conjunto de três ADS proposto possui frequências detalhadas na Tabela 9.

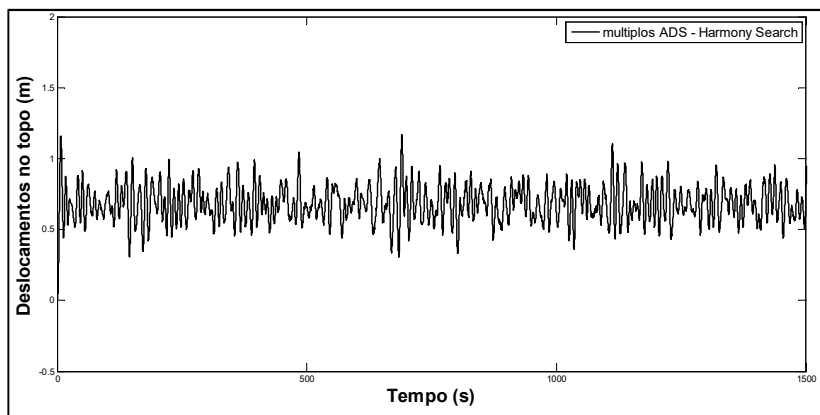
Tabela 9 – Frequência individual dos três ADS instalados na estrutura.

| ADS | Hz     | rad/s  |
|-----|--------|--------|
| 1º  | 0,1183 | 0,7431 |
| 2º  | 0,1389 | 0,8728 |
| 3º  | 0,1683 | 1,0572 |

Fonte: autoria própria.

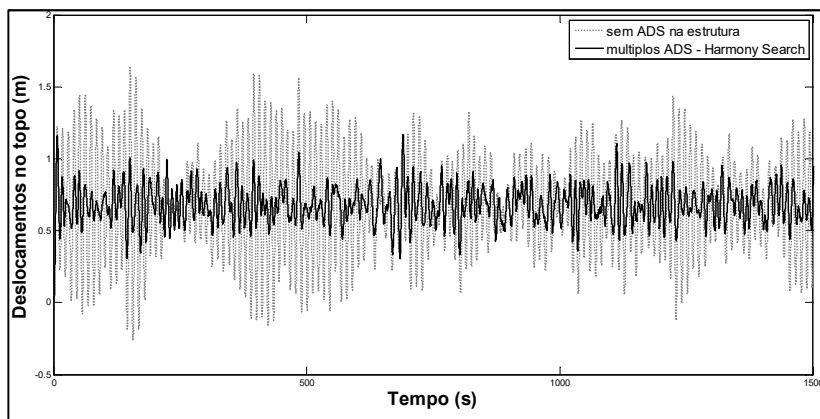
Na Figura 45, encontra-se o gráfico da resposta dos deslocamentos medidos no topo da estrutura em função do tempo. A Figura 46 mostra a sobreposição dos gráficos com controle de múltiplos ADS e sem controle; a Figura 47 mostra a sobreposição dos gráficos da análise da estrutura sem controle, com múltiplos ADS calculados com *Harmony Search* e com ADS simples calculado analiticamente.

Figura 45 – Gráfico dos deslocamentos medidos no topo da estrutura com três ADS instalados, múltiplos ADS dimensionados numericamente via *Harmony Search*.



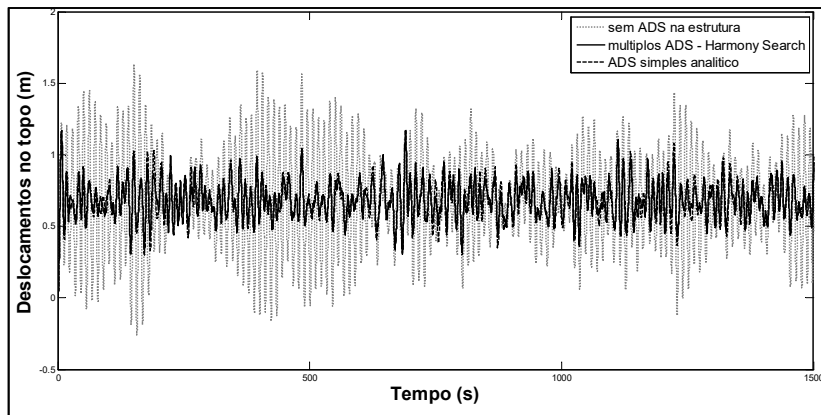
Fonte: autoria própria.

Figura 46 – Sobreposição das respostas sem controle e com três ADS instalados.



Fonte: autoria própria.

Figura 47 – Sobreposição da resposta sem controle, com ADS simples dimensionado analiticamente e com três ADS dimensionados numericamente via *Harmony Search*.



Fonte: autoria própria.

Na figura acima, nota-se que praticamente não há diferença entre a resposta da estrutura com múltiplos ADS e com ADS simples calculado analiticamente. Logo, a comparação dos resultados pode ser observada através da Tabela 10.

Com a implantação de três ADS no topo da estrutura, obtém-se um deslocamento máximo  $u_{\max} = 1,168$  m, representando 26,49% de redução, desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo  $\sigma_{u_{400}} = 0,123$  m, representando 63,80% de redução.

Tabela 10 – Respostas da estrutura sem controle, com ADS simples calculado via método analítico e ADS simples calculado numericamente com *Harmony Search*

|                     | Sem ADS | ADS simples analítico |         | ADS simples – <i>Harmony Search</i> |         | Múltiplos ADS – <i>Harmony Search</i> |         |
|---------------------|---------|-----------------------|---------|-------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|
|                     |         |                       | Redução |                                     | Redução |                                       | Redução |
| $\sigma_{u400}$ (m) | 0,340   | 0,135                 | 60,30%  | 0,131                               | 61,47%  | 0,123                                 | 63,8%   |
| $u_{max}$ (m)       | 1,589   | 1,173                 | 26,19%  | 1,159                               | 27,02%  | 1,168                                 | 26,49%  |

Fonte: autoria própria.

A utilização de múltiplos ADS aumentou o controle estrutural em 3,5% no desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo, em relação ao dimensionamento analítico de ADS simples. Observa-se que os ganhos não foram tão significativos em relação à utilização de ADS simples. Todavia, a utilização de múltiplos ADS pode ser uma alternativa interessante quando se deseja reduzir a massa individual dos ADS, também possibilita manter a estrutura protegida mesmo quando algum dos ADS torna-se inoperante.

Caso exista algum problema de operação no mecanismo de controle, a utilização de múltiplos ADS torna-se uma alternativa interessante, visto que se um dos ADS estiver inoperante a estrutura não estará completamente desprotegida. A seguir, o estudo analisa a estrutura com o conjunto ótimo de três ADS considerando a hipótese de que um destes esteja inoperante.

#### 4.2.8. Resposta da estrutura com múltiplos ADS – considerando um ADS inoperante.

A estrutura será analisada com múltiplos ADS, conjunto ótimo de três ADS detalhado na Sessão 4.2.7, considerando um dos ADS inoperante durante a excitação da estrutura.

Tendo em vista o conjunto de ADS detalhado na Tabela 8, a estrutura será analisada sem a utilização do primeiro ADS. A Tabela 11 exhibe cada ADS utilizado no controle estrutural.

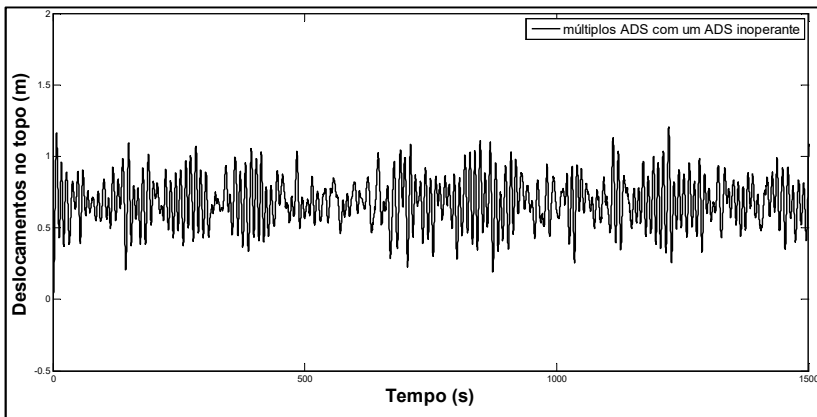
Tabela 11 – Conjunto de ADS utilizado no controle estrutural considerando um ADS inoperante.

| ADS | $k_d (\text{N/m}) \times 10^5$ | $c_d (\text{N.s/m}) \times 10^5$ |
|-----|--------------------------------|----------------------------------|
| 1º  | 4,6140                         | 0,8103                           |
| 2º  | 6,7704                         | 1,7111                           |

Fonte: autoria própria.

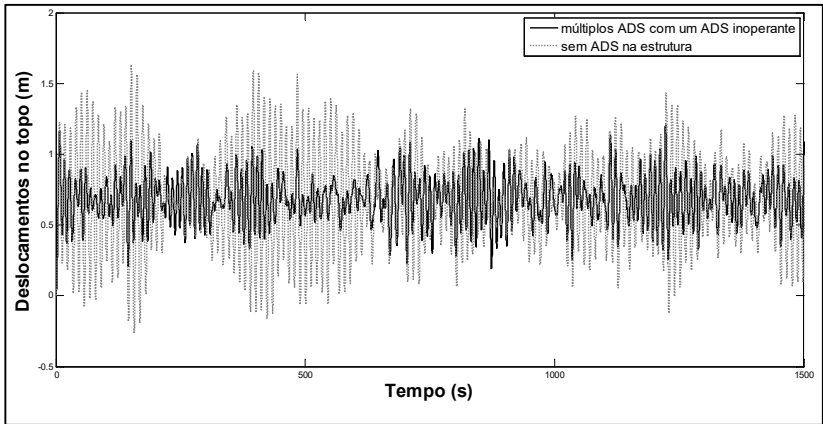
A Figura 48 exibe o gráfico da resposta da estrutura dos deslocamentos medidos no topo em função do tempo. A Figura 49 mostra a sobreposição dos gráficos da resposta sem ADS e com utilização de múltiplos ADS considerando um ADS inoperante.

Figura 48 – Gráfico da resposta da estrutura com controle de múltiplos ADS considerando um dos ADS inoperante.



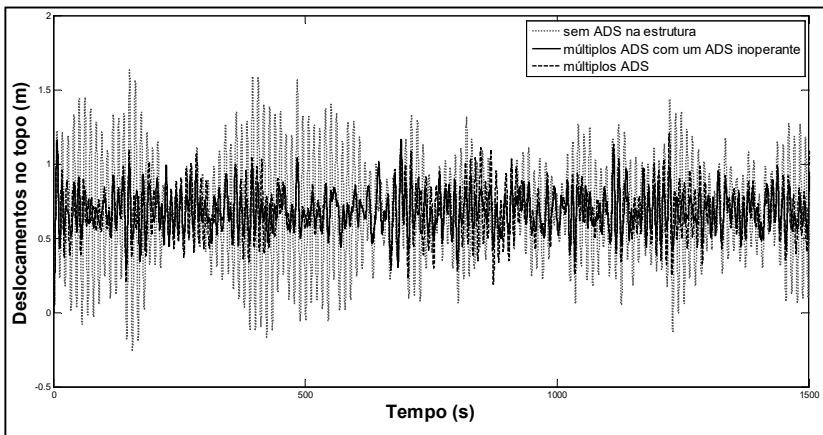
Fonte: autoria própria.

Figura 49 – Sobreposição da resposta da estrutura com controle de múltiplos ADS considerando um dos ADS inoperante com a resposta sem controle.



Fonte: autoria própria.

Figura 50 – Sobreposição da resposta da estrutura com controle de múltiplos ADS considerando um dos ADS inoperante com a resposta da estrutura com controle utilizando todos os ADS ativos.



Fonte: autoria própria.

Utilizando o conjunto de ADS avaliado na Sessão 4.2.7 e aplicando a hipótese de que um dos ADS esteja inoperante, obtém-se um deslocamento máximo de  $u_{\max} = 1,206$  m, representando uma redução de 24,10%, a resposta da estrutura obteve um desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo  $\sigma_{u400} = 0,160$  m, representando uma redução de 52,94%.

Desta forma, conclui-se que a utilização de múltiplos ADS mantém a estrutura protegida mesmo quando um dos ADS torna-se inoperante no controle, seja por problemas operacionais ou por eventuais manutenções do mesmo.



## 5. CONCLUSÃO

A utilização de múltiplos ADS tornou o dimensionamento exponencialmente mais complexo, em relação ao dimensionamento de ADS simples. Não foi encontrada bibliografia que trouxesse o dimensionamento de múltiplos ADS analiticamente. Numericamente, o número de ADS comumente é um dado de entrada do algoritmo de busca, no presente estudo foi constatado que existe a possibilidade de introduzir esta variável nos vetores de busca, acentuando a complexidade do problema.

A fim de avaliar o dimensionamento de múltiplos ADS, o presente trabalho analisou os estudos de Warburton (1982) e Ankireddi e Yang (1996). Ambos utilizaram ADS simples para controlar as oscilações de uma estrutura sujeita à ação de natureza dinâmica. No presente trabalho a estrutura foi submetida à carga dinâmica do vento, gerada aleatoriamente através do espectro de potência de Kaimal. Tendo em vista que a estrutura de estudo possui frequência natural de 0,09 Hz ou 0,5655 rad/s, esta apresentou excessiva oscilação quando excitada pela ação dinâmica do vento, com desvio padrão de 53% em relação ao deslocamento médio medidos no topo. Para atenuar as oscilações excessivas foram estudados modelos de ADS instalados no topo da estrutura.

Inicialmente, avaliou-se a variação da massa do ADS no controle estrutural. Foram utilizadas as expressões analíticas de Warburton (1982), das quais possibilitam determinar os parâmetros  $kd$  e  $cd$  para um ADS. As equações analíticas de Warburton (1982) foram idealizadas para um sinal do tipo *white noise* (ruído branco) e para modelos com apenas um grau de liberdade, desta forma foi utilizado o esquema de Rana e Soong (1998) para reduzir o modelo e utilizar o dimensionamento analítico segundo Warburton (1982). Com isso, possibilitou-se determinar os parâmetros  $kd$  e  $cd$  do ADS para cada massa testada. Assim, o ADS foi introduzido à estrutura discretizada com dez elementos de barra resultando no gráfico da Figura 27, onde mostra a relação da massa do ADS com a capacidade de diminuir o desvio padrão dos deslocamentos no topo da estrutura.

Concluiu-se que para a instalação de ADS simples há um vertiginoso caimento até que a massa do ADS seja 4% da massa total da estrutura; após 4%, a performance do ADS melhora de forma mais branda.

Foram utilizados os algoritmos de otimização BSA e *Harmony Search* para dimensionar ADS simples, a fim de minimizar o desvio

padrão dos deslocamentos medidos no topo e comparar com os resultados obtidos com o dimensionamento analítico de Warburton (1982). Para cada massa do ADS os algoritmos visam obter o melhor conjunto  $kd$  e  $cd$  que forneçam o maior controle estrutural.

Como esperado, ambos os algoritmos obtiveram desempenho semelhante para o dimensionamento de ADS simples. O dimensionamento numérico com *Harmony Search* e BSA para ADS simples resultou em um ganho de desempenho de 2% com uma relação de massa em torno de 7%. Tendo em vista que o ganho de desempenho não foi tão expressivo, conclui-se que o método analítico de Warburton (1982) possibilita dimensionar ADS simples com elevada performance, mesmo para estruturas submetidas à ação dinâmica do vento e contendo vários graus de liberdade.

Em seguida, a estrutura foi analisada com dimensionamento de múltiplos ADS, com o objetivo de avaliar a influência da massa no controle estrutural e comparar com os resultados obtidos com ADS simples.

Com o propósito de determinar o número ótimo de ADS no controle estrutural, a variável que representa o número de ADS foi introduzido ao vetor de busca dos algoritmos de otimização, foi necessário uma adaptação nos algoritmos BSA e *Harmony Search*, de modo que a quantidade de ADS varia o tamanho dos vetores  $kd$  e  $cd$ . Desse modo, foi aplicado um parâmetro em ambos os algoritmos, chamado de taxa de exclusão de ADS, tendo em vista que o algoritmo parte de uma quantidade máxima de ADS e a cada iteração ele avalia a probabilidade de retirar-se um dos ADS do conjunto de busca, com base no desempenho da iteração anterior.

Para comparar o desempenho de múltiplos ADS com ADS simples, a massa total do conjunto de múltiplos ADS manteve-se igual a massa do ADS simples. Analisando o gráfico da Figura 33, observou-se que o aumento da massa total do conjunto de ADS não significa um aumento no controle estrutural, diferentemente do comportamento de ADS simples. O desempenho de múltiplos ADS com massa total de 6% da massa da estrutura foi pior do que o desempenho com 5%. Pode-se concluir que a utilização de múltiplos ADS torna-se muito sensível aos parâmetros do dimensionamento.

A utilização de múltiplos ADS obteve um desempenho 3,5% melhor que o dimensionamento analítico, isto para uma massa de ADS em 3% com relação à massa da estrutura. Contudo, não são resultados tão significativos para se optar por múltiplos ADS ou ADS simples,

desta forma outros critérios devem ser avaliados para a escolha de um ou de outro modelo.

De acordo com Hadi e Arfiad (1998) e Mohebby (2012), existem fatores técnicos que inviabilizam a utilização de ADS com massa maior que 3% da massa da estrutura. Desse modo, o presente trabalho analisou o desempenho de ADS simples dimensionado analiticamente e numericamente com o desempenho de múltiplos ADS com dimensionamento numérico utilizando o algoritmo *Harmony Search*. Com a massa fixada em 3% da massa da estrutura, o dimensionamento analítico proposto por Warburton (1982) atenuou em 60,30% o desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura e redução de 26,19% no deslocamento máximo.

O dimensionamento numérico de ADS simples com o algoritmo *Harmony Search* obteve um desempenho no controle estrutural de 61,47% de redução do desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura e redução de 27,02% no deslocamento máximo. O algoritmo *Harmony Search* para ADS simples apresentou ser 1,47% mais eficiente do que o dimensionamento analítico, confirmando a eficiência de ambos os métodos no dimensionamento de ADS simples para estruturas submetidas à ação dinâmica do vento.

O dimensionamento de múltiplos ADS com o algoritmo *Harmony Search* determinou que são necessários três ADS para obter o melhor desempenho no controle estrutural, a massa de cada ADS  $m_d = 1,8171 \times 10^6$  kg, três vezes menor que a massa do ADS simples. O controle obtido com três ADS reduziu o desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo da estrutura em 63,8% e redução de 26,49% no deslocamento máximo. A utilização dos três ADS demonstrou ser 3,5% mais eficiente que a utilização do ADS simples dimensionado analiticamente e 2,03% mais eficiente que o ADS simples dimensionado numericamente.

Contudo, um ganho de performance de 2,03% não é suficiente para se escolher entre múltiplos ADS ou ADS simples. Todavia, um fator importante que favorece a escolha de múltiplos ADS, é que a estrutura não estará desprotegida quando um dos ADS estiver inoperante. Supondo um período de manutenção ou uma falha nas propriedades da mola ou do amortecedor.

O presente trabalho analisou a eficiência de múltiplos ADS quando um destes está inoperante. Considerando o conjunto ótimo de três ADS, calculado anteriormente, um dos ADS foi desativado para avaliar o comportamento da estrutura. Os dois ADS remanescentes

desempenharam uma redução no deslocamento máximo da estrutura em 24,10% e o desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo foi reduzido em 52,94%. Quando um dos ADS foi desativado o desempenho no controle do deslocamento máximo caiu 2% e reduziu 10,86% a eficiência no controle do desvio padrão dos deslocamentos medidos no topo. Concluímos que ao desativar um dos ADS, num conjunto de múltiplos ADS, a estrutura permanece protegida, favorecendo a utilização de múltiplos ADS.

A utilização de múltiplos ADS também possibilita que a massa individual dos ADS seja reduzida, para o caso analisado a massa de cada ADS é três vezes menor que a massa do ADS simples, facilitando a execução dos mesmos. Segundo Hadi e Arfiad (1998) a massa total do ADS não deveria ultrapassar 3% da massa total da estrutura por questões construtivas, entretanto, a utilização de múltiplos ADS poderia tornar viável um conjunto de ADS com massa superior a 3% da massa da estrutura. A utilização de múltiplos ADS também possibilita que os dispositivos sejam distribuídos verticalmente ao longo da estrutura, deixando as áreas mais elevadas livres, tendo em vista que estas comumente possuem valor mais elevado.

De modo que múltiplos ADS não possuem um dimensionamento simples, cabe ao projetista estudar as alternativas de acordo com suas necessidades para decidir entre as alternativas.

## 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são listadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar a interferência de múltiplos ADS no controle de estruturas sujeitas a sismos;
- Estudar a aplicação de múltiplos ADS distribuídos verticalmente ao longo da estrutura;
- Estudar a aplicação de múltiplos ADS em estruturas horizontalmente esbeltas;
- Utilizar múltiplos ADS com a massa do ADS sendo uma incógnita do problema.
- Utilizar múltiplos ADS compostos.
- Aplicação de incertezas nos múltiplos ADS.
- Aplicar múltiplos ADS com massa variada entre os ADS, de modo a não alterar a massa total do conjunto.

## REFERÊNCIAS

ABDEL-ROHMAN, M. & LEIPHOLZ, H. Active control of tall buildings. *Journal of Structural Engineering*. pp. 109:628-645, 1983.

ALDEMIR, U. Optimal control of structures with semiactive-tune d mass dampers. *Journal of Sound and Vibration*, pp. 847–874, 2003.

AMBROSINI, R., RIERA, J. & DANESI, R. Analysis of structures subjected to random wind loading by simulation in frequency domain. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2002

ANKIREDDI, S. & YANG, H. Simple ATMD control methodology for tall buildings subject to wind loads . *Journal of Structural Engineering*. 1996.

ARGIADI, Y. & HADI, M. Optimum placement and properties of tuned mass dampers using hybrid genetic algorithms. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. pp. 1:167-187, 2011.

ARORA, J. *Introduction to optimum design*. New York: McGraw-Hill, 1989.

ASSIS, A. R. M. G. de. *Avaliação do algoritmo Backtracking Search Optimization adaptado para o tratamento de restrições através de penalização adaptativa (BSA-MPA) na resolução de problemas de engenharia*. 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2014.

BALENDRA, T. *Vibration of building to wind and earthquake loads*. London: Springer - Verlag, 1993.

BATHE, K.-J. *Finite element procedures*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BEKDAS, G. & NIGDELI, S. M. Estimating optimum parameters of tuned mass damper using *Harmony Search*. *Engineering Structures*. 2011.

- BJJ GLOBETROTTER. *36 hours of Taipei madness*. 16 abr. 2011. Disponível em: <<http://www.bjjglobetrotter.com/?p=1532>>. Acesso em: 31 out. 2016.
- BLESSMANN, J. *O vento na engenharia estrutural*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- BORGES, Ronaldo. TORNADO, A Força Da Natureza Em Seu Estado Mais Agressivo. *Norte Verdadeiro*. (online), p. 1-2. 05 jan. 2015. Disponível em: <<http://www.norteverdadeiro.com/tornado-a-forca-da-natureza-em-seu-estado-mais-agressivo/>>. Acesso em: 2 fev. 2016.
- BRUNT, B. V. *The Calculus of Variations*. San Francisco: Springer, 2000.
- CALKIN, M. G. *Lagrangian and Hamiltonian Mechanics*. Singapore: World Scientific, 1996.
- CHAN, C., HUANG, M. & KWOK, K. Integrated wind load analysis and stiffness optimization of tall buildings with 3D modes. *Engineering Structures*, 2010.
- CHENG, F. & LI, D. Multiobjective optimization design with Pareto genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering*, 123:1252–1261, 1997.
- CHOPRA, A. *Dynamics of structures aprimer*. California: Earthquake engineering research institute, 1980.
- CIVICIOGLU, P. Backtracking search optimization Algorithm for Backtracking search optimization Algorithm for. *Applied Mathematics and Computation*, 2013.
- CLOUGH, R. W. & PENZIEN, J. *Dynamics of Structures*. Berkeley: Computers & Structures, 2003.
- COOK, R., PLESHA, M. & WITT, R. *Concepts and applications of finite element analysi*. John Wiley & Sons, Inc. 2002.

COPYRIGHTED MATERIAL. *Thunderstorms and lightning*. jul. 2014. Disponível em: <<http://globalsailingweather.com/thunderstorms.php/>>. Acesso em: 02 fev. 2016.

CRONE, Jack. Watch incredible time-lapse footage of supercell storm forming over Kansas which spewed hailstones bigger than baseballs. *Mail Online*. (online) 8 jun. 2015. Disponível em: <<http://www.dailymail.co.uk/news/article-3115294/Watch-incredible-time-lapse-footage-supercell-storm-forming-Kansas-spewed-hailstones-bigger-BASEBALLS.html>>. Acesso em: 2 fev. 2016.

CRUZ, A. G. *Otimização de estruturas*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

DRÉO, J., SIARRY, P., PÉTROWSKI, A. & TAILLARD, E. *Metaheuristics for hard optimization*. Paris: Springer, 2006.

FUR, L.-S., YANG, H. & SESHASAYEE, A. Vibration control of tall buildings under seismics and wind loads. *Journal of Structural Engineering*, 1996.

FRANTZ, Sâmia; MAGS, André. Dez anos depois do Furacão Catarina, SC ainda pena para avançar na prevenção. *Diário Catarinense*. Florianópolis, p. 1-2. 22 mar. 2014. Disponível em: <<http://dc.clicrbs.com.br/sc/noticias/noticia/2014/03/dez-anos-depois-do-furacao-catarina-sc-ainda-pena-para-avancar-na-prevencao-4454190.html>>. Acesso em: 01 fev. 2016.

GEEM, Z., LEE, K. & TSENG, C.-L. *Harmony Search for Structural Design*. Gecco '05 *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 2005.

GELFAND, I. M. & FOMIN, S. V. *Calculus of Variations*. New York: Dover, 2000.

GLOBALSAILINGWEATHER. *Thunderstorms and lightning*. 2015. Disponível em: <<http://globalsailingweather.com/thunderstorms.php/>>. Acesso em: 31 out. 2016.

GOLDSTEIN, H., POOLE, C. & SAFKO, J. *Classical Mechanics*. Hancover: Addison Wesley, 2001.

GOSSICK, B. R. *Hamilton's Principle and Physical Systems*. New York: Academic Press, 1967.

HADI, M. & ARFIADI, Y. Optimum design of absorber for mdof structures. *Journal of Structural Engineering*. nov. 1998.

HAMILTON, W. R. On a General Method in Dynamic. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, pp. 247-308. Londres, 1834.

HAMILTON, W. R. Second Essay on a General Method in Dynamics. *Philosophical Transactions of the London*, pp. 95-144. Londres, 1835.

HOANG, N. & WARNITCHAI, P. Design of multiple tuned mass dampers by using a numerical optimizer. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34:125–144. 2005.

JAVELIN. 2008 *Contest Winners for SolidWorks and SolidWorks Simulation Designs*. Honourable Mention- Heavy Machinery. Tuned Mass Damper (TMD). Andrew Smith. Disponível em: <[http://www.javelin-tech.com/main/successes/design\\_contest\\_2008.htm](http://www.javelin-tech.com/main/successes/design_contest_2008.htm)>. Acesso em: 31 jan. 2016.

JULIANI, Marco; BECOCCI, Liana. Estádio Morumbi: fim de jogo. *Revista Técnica*. maio 1998.

KAREEM, A. Modelling of base-isolated buildings with passive dampers under winds. *Journal of Wind Engineering*. 1997.

KIM, S., YUN, C.-B. & SPANCER JR, B. Vibration control of wind-excited tall buildings using sliding mode fuzzy control. *Journal of Engineering Mechanics*. 2004.

LEE, K. & GEEM, Z. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: *Harmony Search* theory and practice. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, pp. 3902–3933. 31 set. 2005.

LIU, M.-Y., CHIANG, W.-L., HWANG, J.-H. & CHU, C.-R. Performance assessment of tuned mass damper for wind-induced



vibration mitigation of tall building with soil-structure interaction. *The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*. 2006.

LEMOS, N. A. *Mecânica Analítica*. Livraria de Física. São Paulo, 2007.

LOPEZ, R. & BECK, A. Reliability-based design optimization strategies based on FORM: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, pp. v. 34, p. 506-514. 2012.

MAHMOODI, P. Structural Dampers. *Journal of the Structural Division*. 1969.

MENDONÇA, P.T.R. Análise Dinâmica pelo Método de Elementos Finitos. *Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC*. 2006.

MIGUEL, L. F. *Estudo Teórico e Experimental de Amortecedores de Vibrações Por Atrito*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002.

MIGUEL, L., MENEZES, R., KAMINSKI, J. & RIERA, J. Simulação de modelos dinâmicos de vento para aplicação em torres metálicas de lts. *XXI snptee seminário nacionalde produção e transmissão de energia elétrica*. Florianópolis. 2011.

MIGUEL, L., MIGUEL, L., KAMINSKI, J., RIERA, J. & MENEZES, R. Model uncertainty in the assessment of EPS wind loads in transmission line design. *Proceedings of the International Seminar on Modeling and Identification of Structures Subjected to Dynamic Excitation*. emphasis to Transmission Lines. 2009.

MIGUEL, L., MIGUEL, L., RIERA, J., KAMINSKI, J. & MENEZES, R. Assessment of code recommendations through simulation of EPS wind loads along a segment of a transmission line. *Engineering Structures*. 2012.

MOHEBBI, M., SHAKERI, K., GHANBARPOUR, Y. & MAJZOUB, H. Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures. *Journal of Vibration and Control*. 2012.

- NEMIR, D., LIN, Y. & OSEGUEDA, R. Semiactive motion control using variable stiffness. *Journal of Structural Engineering*, pp. 1291-1306. 1994.
- NESBET, R. K. *Variational Principles and Methods*. Cambridge: Cambridge University Press. 2004.
- PADARATZ, I. J. *Velocidade Básica do Vento No Brasil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1977.
- PATIL, V. & JANGID, R. Double friction dampers for wind excited benchmark building. *International Journal of Applied Science and Engineering*. 2009.
- PENG, F., GU, M. & NIEMANN, H.-J. Study on sinusoidal reference strategy-based adaptive feedforward control applied to benchmark wind-excited building. *Journal of Engineering Mechanics*. abr. 2004.
- PONTE, J. & RIERA, J. Wind velocity field during thunderstorms. *Wind and Structures*. 2007.
- PORTAL TERRA. *Climatempo*. Disponível em: <<http://www.climatempo.com.br/>>. Acesso em: jul. 2014.
- PREUMONT, A. *Twelve Lectures on Structural Dynamics*. Bruxelas: Université Libre de Bruxelles. 2013.
- RANA, R. & SOONG, T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. *Engrg. Struct*, 20(3), 193-204. 1998.
- RIERA, J. Analysis of structures subjected to random loading using the transfer matrix or numerical integration methods. *Engineering Structures*. 1992.
- ROSENBERG, R. M. *Analytical Dynamics of Discrete Systems*. New York: Plenum Press. 1980.
- RWDI. *Dampers - RWDI*. Disponível em: <[https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTIG16H\\_09-BIySt3HbnQKCCPGR\\_W6ejREsWme5z7aumIzUjJxHtA](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTIG16H_09-BIySt3HbnQKCCPGR_W6ejREsWme5z7aumIzUjJxHtA)>. Acesso em: 01 fev. 2016.

SADEK, F., MOHRAZ, B., TAYLOR, A. & CHUNG, R. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 617 - 635. 1997.

SAMALI, B., XU, Y. & KWORK, K. Control of along-wind response of structures by mass and liquid dampers. *Journal of Engineering Mechanics*,, p. 424. 1992.

SAUL, W., JAYACHANDRA, P. & PEYROT, A. Response to stochastic wind of n-degree tall buildings. *Journal of the Structural Division*. 1976.

SCALABRIN, M., PARPINELI, R. & LOPES, H. Paralelização do algoritmo *Harmony Search* utilizando unidade de processamento gráfico. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*. nov. 2010.

SOUZA, R. Metodologia Para Otimização topológica, Dimensional e Geométrica de Estruturas de Torres de Linhas de Transmissão. *Universidade Federal de Santa Catarina*. 2014.

THE MATHWORKS. *Matlab the language of technical computing*. 2004. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/>>. Acesso em: jul. 2014.

THOMPSON, A. Optimum damping and tuning of a dynamic vibration absorber applied to a force excited and damped primary system. *J Sound Vib*. 1981.

YANG, J. & SAMALI, B. Control of tall buildings in along-wind motion. *Journal of Structural Engineering*. 1983.

YANG, J., AGRAWAL, A., SAMALI, B. & WU, J. A benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings. *Journal of Engineering Mechanics*. 2004.

YANG, X. Firefly algorithms for multimodal optimization. In: *Stochastic algorithms: foundation Lecture notes in computer sciences*. 2009.

ZAHRAI, S. & SHAFIEEZADEH, A. Semi-active control of the wind-excited benchmark tall building using a fuzzy controller\*. *Iranian Journal of Science & Technology*. 2009.

ZIENKIEWICZ, O. & TAYLOR, R. *The finite element method*. McGraw-Hill, 1998.