

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE
VIBRAÇÕES PARA O ESTÁDIO NACIONAL**

LEONARDO JOSÉ GUIMARÃES RABELO

ORIENTADORA: GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: 11A/16
BRASÍLIA/DF: JUNHO/2016**


**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE VIBRAÇÕES
PARA O ESTÁDIO NACIONAL**

LEONARDO JOSÉ GUIMARÃES RABELO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:



**Prof.^a Graciela Doz, Dr. Ing. (ENC-UnB)
(Orientadora)**



**Prof. Suzana Moreira Avila, Dra. (UnB/Gama)
(Examinadora Interno)**



**Prof. José Guilherme Santos da Silva, Dr. (UERJ)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 07 DE JUNHO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

RABELO, LEONARDO JOSÉ GUIMARÃES

Proposta de um Sistema de Controle de Vibrações do Estádio Nacional
[Distrito Federal] 2016.

xxiii, 208p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2016).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de
Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Dinâmica das Estruturas 2. Vibrações Induzidas por Atividades Humanas

3. Controle de Vibrações em Estruturas de Estádios 4. Conforto Humano

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RABELO, L. J. G (2016) Proposta de um Sistema de Controle de Vibrações do Estádio Nacional. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-11A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 208p.

CESSÃO DE DIREITOS

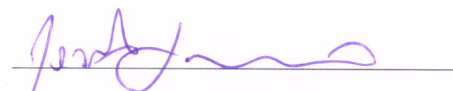
AUTOR: Leonardo José Guimarães Rabelo.

TÍTULO: Proposta de um Sistema de Controle de Vibrações do Estádio Nacional

GRAU: Mestre

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Leonardo José Guimarães Rabelo

Rua dos Bandolins, 175 – Ap. 806

30.850-470 Belo Horizonte – MG – Brasil.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Brasília pela oportunidade proporcionada.

À minha orientadora, Professora Graciela Nora Doz de Carvalho, pelos ensinamentos, pelo esforço e dedicação empregados em me orientar e pelo voto de confiança.

Aos Professores José Guilherme Santos da Silva e Suzana Moreira Ávila, pelas contribuições dadas ao trabalho.

Ao Engenheiro Gustavo Valença Fiuza Lima, pela disponibilização de boa parte do material utilizado para a conclusão deste trabalho.

Aos demais Professores do PECC, pelos conhecimentos e ensinamentos transmitidos.

Aos meus chefes, Engenheiro Euler José dos Santos e Engenheiro Nilvan Chaves Braga pela colaboração na liberação da minha licença capacitação.

Aos antigos colegas de trabalho da Ancora Engenharia, pela aprendizagem e bons momentos vividos.

Aos meus amigos de Carmo do Cajuru, pelo apoio dado nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos, pelo carinho e confiança em mim depositada.

Ao meu pai, pelos ensinamentos que me guiaram até aqui.

E finalmente à minha mãe, que tanto lutou a vida toda para que eu sempre buscasse o conhecimento.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”

Leonardo da Vinci

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano. Mas o que seria o oceano se não infinitas gotas?”

Isaac Newton

RESUMO

PROPOSTA DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE VIBRAÇÕES PARA O ESTÁDIO NACIONAL

Autor: Leonardo José Guimarães Rabelo

Orientadora: Graciela Nora Doz de Carvalho

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, junho de 2016

Os carregamentos cíclicos oriundos das atividades rítmicas humanas podem causar vibrações excessivas nas estruturas que os recebem. As arquibancadas de estádios estão sujeitas a esses tipos de carregamentos e, às vezes, precisam ser adequadas para proporcionar um nível mínimo de conforto às pessoas que delas se utilizam.

O presente trabalho apresenta propostas de atenuação das vibrações nas arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília. O estudo é numérico, via Método dos Elementos Finitos, e objetiva a redução das acelerações da estrutura com o emprego de amortecedores de massa sintonizados (AMS) e amortecedores de massa sintonizados múltiplos (AMSM).

Primeiramente é realizada uma análise em que a estrutura é submetida a diversos carregamentos dinâmicos que simulam as atividades do público nas arquibancadas. Para esta tarefa são utilizados distintos modelos de carga, variando a frequência dos saltos e a ocupação da torcida na estrutura. São calculadas as acelerações em quatro pontos distintos, que são escolhidos a partir dos maiores deslocamentos observados na análise modal. As vibrações são comparadas aos normativos e recomendações vigentes e então encontrada a situação mais crítica de carregamento.

No geral a estrutura apresenta respostas aceitáveis em termos de vibrações, mostrando problemas em apenas um ponto. Para esse local é realizado um estudo de atenuação das acelerações, tendo como base o carregamento mais desfavorável. São examinadas diversas configurações de AMS e AMSM com o objetivo de encontrar o arranjo que apresente a redução de vibração a níveis aceitáveis, tendo como base a menor da massa dos amortecedores. Para o arranjo escolhido, realiza-se ainda a verificação da estrutura para as condições de carregamento menos desfavoráveis estudadas, com o intuito de se verificar a eficiência dos dispositivos de atenuação para as mais diversas situações de carga e, de fato, a inserção dos amortecedores reduz as acelerações a níveis aceitáveis em praticamente todos os casos, mostrando-se uma solução bastante eficiente.

Palavras-chave: Dinâmica das estruturas, vibrações induzidas por atividades humanas, controle de vibrações em estruturas de estádios, conforto humano.

ABSTRACT

MOTION FOR A VIBRATIONS CONTROL SYSTEM OF THE NATIONAL STADIUM

Author: Leonardo José Guimarães Rabelo

Supervisor: Graciela Nora Doz de Carvalho

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, June 2016

The cyclic loading derived from human rhythmic activities can result in excessive vibrations in structures that receive them. The stands of stadiums are subject to these types of loads and, sometimes, must be adequate to provide a minimum level of comfort to the people who make use of them.

This paper presents proposals to mitigate vibrations in the stands the *Estádio Nacional de Brasília*. The study is numerical, conducted by the Finite Element Method, and aims to reduce the structure of the accelerations with the use of tuned mass dampers (TMD) and multiple tuned mass dampers (MTMD).

First is done an analysis in which the structure is subjected to various dynamic loads that simulate the jumping crowds on the grandstands. For this task are used different load models, varying the frequency of the jumps and the crowd of occupation in the stands. Acceleration is calculated at four different points, which are chosen from the largest displacements in the observed modal analysis. The vibrations are compared to normative and current recommendations and then found the most critical situation of loading.

Overall the structure has acceptable answers in terms of vibrations, showing problems at only one point. To this point a study of attenuation is performed, based on the most unfavorable loading. Various TMD and MTMD configurations are examined, in order to find the arrangement that present vibration reduction to acceptable levels, based on the lower mass damper. For the chosen arrangement, a structure check is performed for the less unfavorable loading conditions studied, in order to verify the effectiveness of mitigation devices for many different loads, and, in fact, the dampers reduces the acceleration to acceptable levels in almost all cases, being a very efficient solution.

Keywords: Dynamics of structures, vibrations induced by human activities, vibrations control in stadium structures, human comfort.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. METODOLOGIA	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2. VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR ATIVIDADES RÍTMICAS HUMANAS.....	6
2.2.1. Vibrações Induzidas em Passarelas	6
2.2.2. Vibrações Induzidas em Pisos	7
2.2.3. Vibrações Induzidas em Arquibancadas.....	11
2.3. TIPOS DE AMORTECEDORES UTILIZADOS NO CONTROLE DE VIBRAÇÃO	17
2.3.1. Controle Passivo de Vibração.....	17
2.3.2. Controle Ativo de Vibração.....	19
2.3.3. Controle Semi-ativo de Vibração	19
2.3.4. Controle Híbrido de Vibração	19
2.4. ESTUDOS E APLICAÇÕES DE AMORTECEDORES NO CONTROLE DE VIBRAÇÃO	20
2.4.1. Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos (AMSM) em Passarelas	20
2.4.2. Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos em Pisos	21
2.4.3. Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos em Arquibancadas.....	27
3. EMBASAMENTO TEÓRICO	30
3.1. EQUAÇÕES DO MOVIMENTO PARA SISTEMAS SIMPLES LIGADOS A UM AMS	30
3.2. EQUAÇÕES DO MOVIMENTO PARA SISTEMAS COMPLEXOS LIGADOS A VÁRIOS AMS	30
3.3. CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO PARA AMS	31
3.3.1. Critério de Den Hartog para otimização do AMS	31
3.3.2. Critério de Jangid para otimização do AMS	32
3.4. MODELAGEM DO CARREGAMENTO	35
3.4.1. Modelo proposto por Bachmann <i>et al</i> (1987).....	35
3.4.2. Modelo proposto pelo CEB 209 (1991)	37
3.4.3. Modelo proposto por Faísca (2003).....	38
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
4. CONFORTO HUMANO	42
4.1. ISO 2631/1 (1985)	42
4.2. BACHMANN <i>et al</i> (1995)	44
4.3. CEB 209 (1991)	45
4.4. ISO 2631/1 (1997)	45
4.5. ELLIS E LITTLER (2004)	48
4.6. SETAREH (2012).....	49
4.7. NBR 6118 (2014).....	50

4.8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
5.	FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	51
5.1.	ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS.....	51
5.1.1.	Elementos tipo <i>frame</i>	51
5.1.2.	Elementos tipo <i>shell</i>	52
5.2.	ANÁLISE MODAL.....	54
5.3.	ANÁLISE DO TIPO TIME-HISTORY	55
5.4.	MODELAGEM DOS AMORTECEDORES DE MASSA	55
5.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
6.	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA.....	57
6.1.	O ESTÁDIO NACIONAL DE BRASÍLIA	57
7.	ANÁLISE NUMÉRICA	61
7.1.	MODELAGEM NUMÉRICA	61
7.2.	ANÁLISE MODAL DA ARQUIBANCADA	64
7.2.1.	Modos de Vibração da Arquibancada	64
7.3.	ANÁLISE DINÂMICA DA ARQUIBANCADA.....	71
7.3.1.	Modelagem do Carregamento	71
7.3.2.	Aplicação do carregamento	79
7.3.3.	Amortecimento Estrutural	81
7.4.	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO FORÇADA	81
7.4.1.	Acelerações obtidas para o MC1	81
7.4.2.	Acelerações obtidas para o MC2	85
7.4.3.	Acelerações obtidas para o MC3	89
7.4.4.	Acelerações obtidas para o MC4	92
7.4.5.	Acelerações obtidas para o MC5	96
7.4.6.	Verificação das respostas dinâmicas quanto aos limites normativos	100
7.5.	ESTUDOS DE ATENUAÇÃO DAS VIBRAÇÕES COM O USO DE AMS e AMSM.....	107
7.5.1.	Estudo 01 – Sintonização de dois AMS considerando a quinta frequência natural ($f_5 = 4,95\text{Hz}$) e $\mu=0,001$	109
7.5.2.	Estudo 02 – Sintonização de dois AMS considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,001$	112
7.5.3.	Estudo 03 – Sintonização de dois AMS considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,001$	115
7.5.4.	Estudo 04 – Sintonização de dois AMS considerando o segundo harmônico da frequência de excitação ($f_{2h} = 5,10\text{Hz}$) e $\mu=0,001$	117
7.5.5.	Estudo 05 – Sintonização de dois AMS considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$	119
7.5.6.	Estudo 06 – Sintonização de dois AMS considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$	121
7.5.7.	Estudo 07 – Sintonização de dois AMS considerando o segundo harmônico da frequência de excitação ($f_{2h} = 5,10\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$	123
7.5.8.	Estudo 08 – Sintonização de dois AMS considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$	125

7.5.9. Estudo 09 – Sintonização de dois AMS considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$	127
7.5.10. Estudo 10 – Sintonização de dois AMS considerando o segundo harmônico da frequência de excitação ($f_{2h} = 5,10\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$	129
7.5.11. Estudo 11 – Sintonização de quatro AMS, sendo dois com a sexta e dois com a sétima frequências naturais ($f_6 = 5,07\text{Hz}$ e $f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$	131
7.5.12. Estudo 12 – Sintonização de quatro AMS, sendo dois com a sexta e dois com a sétima frequências naturais ($f_6 = 5,07\text{Hz}$ e $f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$	134
7.5.13. Estudo 13 – Sintonização de quatro AMSM considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$	136
7.5.14. Estudo 14 – Sintonização de quatro AMSM considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$	139
7.5.15. Estudo 15 – Sintonização de quatro AMSM considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$	141
7.5.16. Estudo 16 – Sintonização de quatro AMSM considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$	143
7.6. MODELO PROPOSTO PARA OS AMS E AMSM OBTIDOS	145
7.7. VERIFICAÇÃO DAS PROPOSTAS DE CONTROLE QUANTO AOS LIMITES DE VIBRAÇÃO	148
7.8. VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA COM OS AMS DA OITAVA PROPOSTA INSTALADOS PARA DIVERSAS SITUAÇÕES DE CARREGAMENTO	151
8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	161
8.1. CONCLUSÕES	161
8.1.1. Análise modal	161
Análise dinâmica considerando diferentes cenários de carregamentos.....	162
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	166
8.2.1. Atualização do modelo estrutural	166
8.2.2. Verificações dos carregamentos e demais parâmetros	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	168
ANEXOS	172
A1 – Demais modos de vibração da arquibancada.....	172
A2 – Deslocamentos e acelerações dos quatro pontos analisados nos modelos MC1 a MC6	178
A3 – Verificação da peça pré-moldada da arquibancada	203

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Coeficientes para o cálculo da razão ótima de frequências	33
Tabela 3.2 – Coeficientes para o cálculo de AMSM ótimo, Jangid (1999)	34
Tabela 3.3 – Parâmetros de projeto recomendados pelo CEB 209 (1991).....	38
Tabela 3.4 – Parâmetros de projeto recomendados por Faísca (2003).....	41
Tabela 4.1 – Níveis de vibração aceitáveis para diferentes ambientes.....	44
Tabela 4.2 – Faixas de percepção humanas devido à vibração vertical – CEB 209 (1991)	45
Tabela 4.3 – Limites de aceleração em VDV, Ellis e Littler (2012) <i>apud</i> Campista (2015)	49
Tabela 4.4 – Limites de aceleração em VDV, Setareh (2012) <i>apud</i> Campista (2015)	49
Tabela 4.5 – Frequência crítica para estruturas – NBR 6118 (2014)	50
Tabela 7.1 – Descrição dos modos de vibração.....	65
Tabela 7.2 – Frequências de excitação adotadas no modelo numérico	72
Tabela 7.3 – Tempos de contato medidos experimentalmente – Faísca (2003).....	73
Tabela 7.4 – Parâmetros utilizados nos carregamentos dinâmicos	74
Tabela 7.5 – Pontos para leitura das acelerações.....	78
Tabela 7.6 – Limites de acelerações de pico segundo o CEB 209 (1991)	100
Tabela 7.7 – Análise dos limites normativos para aceleração de pico na direção vertical	101
Tabela 7.8 – Limites de acelerações em <i>RMS</i> segundo A ISO 2631 (1985).....	102
Tabela 7.9 – Limites de acelerações em <i>RMS</i> segundo A ISO 2631 (1997).....	102
Tabela 7.10 – Análise dos limites normativos para aceleração em <i>RMS</i> na direção vertical	103
Tabela 7.11 – Limites de acelerações em VDV segundo Ellis e Littler (2004)	103
Tabela 7.12 – Limites de acelerações em VDV segundo Setareh (2012)	103
Tabela 7.13 – Análise das acelerações em VDV na direção vertical	104
Tabela 7.14 – Análise dos limites normativos para aceleração em <i>RMS</i> na direção radial	105
Tabela 7.15 – Análise dos limites normativos para aceleração em <i>RMS</i> na direção tangencial.....	106
Tabela 7.16 – Análise dos limites normativos para aceleração em <i>RMS</i> na direção tangencial, levando em conta a carga horizontal adicional	107
Tabela 7.17 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 4,95Hz e $\mu = 0,001$	109
Tabela 7.18 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a quinta frequência e $\mu=0,001$	111
Tabela 7.19 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,001$	112
Tabela 7.20 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta frequência e $\mu=0,001$	113
Tabela 7.21 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,001$	115

Tabela 7.22 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sétima frequência e $\mu=0,001$	116
Tabela 7.23 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu = 0,001$	117
Tabela 7.24 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando o segundo harmônico do carregamento e $\mu=0,001$	118
Tabela 7.25 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,0005$	119
Tabela 7.26 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta frequência e $\mu=0,0005$	119
Tabela 7.27 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,0005$	121
Tabela 7.28 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sétima frequência e $\mu=0,0005$	122
Tabela 7.29 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu = 0,0005$	123
Tabela 7.30 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando o segundo harmônico do carregamento e $\mu=0,0005$	124
Tabela 7.31 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,00025$	125
Tabela 7.32 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta frequência e $\mu=0,00025$	126
Tabela 7.33 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,00025$	127
Tabela 7.34 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sétima frequência e $\mu=0,00025$	128
Tabela 7.35 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu = 0,00025$	129
Tabela 7.36 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sétima frequência e $\mu=0,00025$	130
Tabela 7.37 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e 5,12Hz, com $\mu = 0,0005$	131
Tabela 7.38 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta e sétima frequências e $\mu=0,0005$	133
Tabela 7.39 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e 5,12Hz e $\mu = 0,00025$	134
Tabela 7.40 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta e sétima frequências e $\mu=0,00025$	135
Tabela 7.41 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,0005$	136
Tabela 7.42 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMSM considerando a sexta frequência e $\mu=0,0005$	138
Tabela 7.43 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,0005$	139

Tabela 7.44 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMSM considerando a sétima frequência e $\mu=0,0005$	139
Tabela 7.45 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,00025$	141
Tabela 7.46 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMSM considerando a sexta frequência e $\mu=0,00025$	141
Tabela 7.47 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,00025$	143
Tabela 7.48 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMSM considerando a sétima frequência e $\mu=0,00025$	143
Tabela 7.49 – Características dos Amortecedores.....	147
Tabela 7.50 – Verificação das acelerações de pico para as propostas de controle estudadas	148
Tabela 7.51 – Verificação das acelerações em <i>RMS</i> para as propostas de controle estudadas.....	149
Tabela 7.52 – Verificação das acelerações em <i>VDV</i> para as propostas de controle estudadas.....	150
Tabela 7.53 – Verificação das acelerações de pico para o MC1	152
Tabela 7.54 – Verificação das acelerações em <i>VDV</i> para o MC1	152
Tabela 7.55 – Verificação das acelerações em <i>RMS</i> para o MC1	153
Tabela 7.56 – Verificação das acelerações de pico para o MC2	154
Tabela 7.57 – Verificação das acelerações em <i>VDV</i> para o MC2	154
Tabela 7.58 – Verificação das acelerações em <i>RMS</i> para o MC2	155
Tabela 7.59 – Verificação das acelerações de pico para o MC3	156
Tabela 7.60 – Verificação das acelerações em <i>VDV</i> para o MC3	156
Tabela 7.61 – Verificação das acelerações em <i>RMS</i> para o MC3	157
Tabela 7.62 – Verificação das acelerações de pico para o MC4	158
Tabela 7.63 – Verificação das acelerações em <i>VDV</i> para o MC4	158
Tabela 7.64 – Verificação das acelerações em <i>RMS</i> para o MC4	159
Tabela A.1 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC1	178
Tabela A.2 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC2	178
Tabela A.3 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC3	179
Tabela A.4 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC4	179
Tabela A.5 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC5	180
Tabela A.6 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC6	180
Tabela A.7 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC1 com AMS	180
Tabela A.8 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC2 com AMS	181
Tabela A.9 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC3 com AMS	181
Tabela A.10 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC4 com AMS	182

Tabela A.11 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC5 com AMS	182
Tabela A.12 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC1	183
Tabela A.13 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC1	183
Tabela A.14 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC1	184
Tabela A.15 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC1	184
Tabela A.16 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC2	185
Tabela A.17 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC2	185
Tabela A.18 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC2	186
Tabela A.19 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC2	186
Tabela A.20 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC3	187
Tabela A.21 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC3	187
Tabela A.22 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC3	188
Tabela A.23 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC3	188
Tabela A.24 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC4	189
Tabela A.25 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC4	189
Tabela A.26 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC4	190
Tabela A.27 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC4	190
Tabela A.28 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC5	191
Tabela A.29 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC5	191
Tabela A.30 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC5	192
Tabela A.31 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC5	192
Tabela A.32 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC1	193

Tabela A.33 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC1	193
Tabela A.34 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC1	194
Tabela A.35 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC1	194
Tabela A.36 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC2	195
Tabela A.37 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC2	195
Tabela A.38 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC2	196
Tabela A.39 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC2	196
Tabela A.40 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC3	197
Tabela A.41 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC3	197
Tabela A.42 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC3	198
Tabela A.43 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC3	198
Tabela A.44 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC4	199
Tabela A.45 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC4	199
Tabela A.46 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC4	200
Tabela A.47 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC4	200
Tabela A.48 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC5	201
Tabela A.49 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC5	201
Tabela A.50 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC5	202
Tabela A.51 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC5	202
Tabela A.52 – Propriedades da bancada.....	204
Tabela A.53 – Propriedades da bancada.....	204
Tabela A.54 – Flechas iniciais da bancada.....	206

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo discretizado da passarela estaiada sobre a BR-116 – Barros (2009) .6	6
Figura 2.2 – Passarela sobre a Linha Vermelha – Silva (2009)	7
Figura 2.3 – Croquis do primeiro modelo estudado por Sommer – Sommer (2002).....	8
Figura 2.4 – Croquis do segundo modelo estudado por Sommer – Sommer (2002)	9
Figura 2.5 – Piso de academia estudado – Da Silva <i>et al</i> (2014)	10
Figura 2.6 – Croqui da estrutura analisada – D’Ambra <i>et al</i> (1997)	11
Figura 2.7 – Dois primeiros modos de vibração para pórtico plano – D’Ambra <i>et al</i> (1997)	11
Figura 2.8 – Dois primeiros modos de vibração para pórtico espacial – D’Ambra <i>et al</i> (1997)	12
Figura 2.9 – Estádio Algarve em construção – Martins <i>et al</i> (2004).....	13
Figura 2.10 – Discretização tridimensional do modelo utilizada – Martins <i>et al</i> (2004) ..	13
Figura 2.11 – Arquibancada temporária – Brito (2011)	14
Figura 2.12 – Modelo discretizado do Estádio Nacional – Lima (2013)	15
Figura 2.13 – Transformadas de Fourier para o carregamento de 64 pessoas – Campista (2015)	16
Figura 2.14 – Passarela do Millenium, Londres – Inglaterra	20
Figura 2.15 – Passarela sobre a E.P.I.A – Gomes (2006).....	21
Figura 2.16 – Detalhe da estrutura estudada por Lima (2007)	22
Figura 2.17 – Laje com um AMS no ponto central – Dos Santos (2009)	23
Figura 2.18 – Laje com dos AMS próximos às bordas – Dos Santos (2009).....	23
Figura 2.19 – Evolução das acelerações com incrementos de AMSM – Martins (2011) 24	24
Figura 2.20 – Carregamento do piso de academia estudado – Gaspar <i>et al</i> (2016)	25
Figura 2.21 – Locação dos AMS no piso – Gaspar <i>et al</i> (2016)	26
Figura 2.22 – Vista da nova arquibancada do Soldier Field, Chicago – Estados Unidos .27	27
Figura 2.23 – Vista da arquibancada e seção transversal – Reynolds <i>et al</i> (2012)	28
Figura 2.24 – Vista da arquibancada pré-moldada e seção transversal – Silva (2012)	29
Figura 3.1 – Sistema simples com um AMS – Lara (2007)	30
Figura 3.2 – Carregamento oriundo do salto de uma pessoa – Bachmann <i>et al</i> (1987)....	36
Figura 3.3 – Variação do coeficiente de impacto com a taxa t_c/T_p – Bachmann <i>et al</i> (1987)	36
Figura 3.4 – Comparação entre as curvas experimental, semi-seno e <i>Hanning</i> – Faísca (2003)	39
Figura 3.5 – Coeficientes de defasagem em função da atividade e número de pessoas –.40	40
Figura 4.1 – Sistemas de coordenadas segundo a orientação da pessoa – ISO 2631/1 (1985)	43
Figura 4.2 – Limites para aceleração segundo o eixo z para o limite de fadiga – ISO 2631/1 (1985)	43
Figura 4.3 – Limites para aceleração segundo os eixos x ou y para o limite de fadiga – ISO 2631/1 (1985).....	44
Figura 4.4 – Guia de efeito à saúde – ISO 2631/1 (1997).....	47
Figura 4.5 – Curvas de ponderação em função da frequência – ISO 2631/1 (1997)	47

Figura 5.1 – Tipos de esforços nos elementos tipo <i>frame</i> – SAP2000.....	52
Figura 5.2 – Elemento shell de quatro nós – SAP2000.....	53
Figura 5.3 – Elemento shell de 3 nós – SAP2000.....	53
Figura 5.4 – <i>Link</i> para Amortecedor de Massa Sintonizado.....	56
Figura 6.1 – Abertura da Copa das Confederações FIFA 2013	57
Figura 6.2 – Corte da arquibancada do Estádio Nacional – Lima (2013)	58
Figura 6.3 – Vista em planta do Estádio Nacional – Lima (2013)	59
Figura 6.4 – Cobertura do Estádio Nacional de Brasília em construção – Lima (2013)...	60
Figura 6.5 – Vista do Estádio Nacional de Brasília.....	60
Figura 7.1 – Vista em perspectiva do modelo numérico	62
Figura 7.2 – Vista lateral do modelo numérico	62
Figura 7.3 – Vista da parte posterior do estádio	63
Figura 7.4 – 1º modo de vibração – $f_1 = 1,02\text{Hz}$ – Flexão tangencial da estrutura	66
Figura 7.5 – 2º modo de vibração – $f_2 = 2,27\text{Hz}$ – Flexão radial da estrutura.....	66
Figura 7.6 – 3º modo de vibração – $f_3 = 2,48\text{Hz}$ – Torção da arquibancada superior.....	67
Figura 7.7 – 4º modo de vibração – $f_4 = 2,78\text{Hz}$ – Flexão tangencial da estrutura	67
Figura 7.8 – 5º modo de vibração – $f_5 = 4,95\text{Hz}$ – Flexão tangencial da estrutura e flexão vertical da arquibancada superior	68
Figura 7.9 – 6º modo de vibração – $f_6 = 5,07\text{Hz}$ – Flexão dos pilares laterais e flexão vertical da arquibancada superior	68
Figura 7.10 – 7º modo de vibração – $f_7 = 5,12\text{Hz}$ – Flexão dos pilares laterais e flexão vertical da arquibancada superior	69
Figura 7.11 – 8º modo de vibração – $f_8 = 5,48\text{Hz}$ – Flexão radial da estrutura.....	69
Figura 7.12 – Relação entre tempo de contato pelo período em função da frequência característica – Lima (2013).....	73
Figura 7.13 – Ocupação das arquibancadas no modelo MC1 – Escala em $[\text{kN}/\text{m}^2]$	75
Figura 7.14 – Ocupação das arquibancadas no modelo MC2 – Escala em $[\text{kN}/\text{m}^2]$	76
Figura 7.15 – Ocupação das arquibancadas no modelo MC3 – Escala em $[\text{kN}/\text{m}^2]$	76
Figura 7.16 – Ocupação das arquibancadas no modelo MC4 – Escala em $[\text{kN}/\text{m}^2]$	77
Figura 7.17 – Ocupação das arquibancadas no modelo MC5 – Escala em $[\text{kN}/\text{m}^2]$	77
Figura 7.18 – Pontos de leitura das acelerações	78
Figura 7.19 – Função de carga para frequência igual a $2,55\text{Hz}$	80
Figura 7.20 – Carregamento de torcida para a frequência de $2,55\text{Hz}$	80
Figura 7.21 – Transformada de Fourier para o carregamento com frequência de $2,55\text{Hz}$	81
Figura 7.22 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC1	82
Figura 7.23 – Acelerações de pico no ponto 1 – MC1	82
Figura 7.24 – Acelerações de pico no ponto 2 – MC1	82
Figura 7.25 – Acelerações de pico no ponto 3 – MC1	83
Figura 7.26 – Acelerações de pico no ponto 4 – MC1	83
Figura 7.27 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC1.....	84
Figura 7.28 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC1	84
Figura 7.29 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 3 – MC1.....	85
Figura 7.30 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC2	85
Figura 7.31 – Acelerações de pico no ponto 1 – MC2	86

Figura 7.32 – Acelerações de pico no ponto 2 – MC2	86
Figura 7.33 – Acelerações de pico no ponto 3 – MC2	86
Figura 7.34 – Acelerações de pico no ponto 4 – MC2	87
Figura 7.35 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC2.....	87
Figura 7.36 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC2.....	88
Figura 7.37 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 1 – MC2.....	88
Figura 7.38 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC3	89
Figura 7.39 – Acelerações de pico no ponto 1 – MC3	89
Figura 7.40 – Acelerações de pico no ponto 2 – MC3	90
Figura 7.41 – Acelerações de pico no ponto 3 – MC3	90
Figura 7.42 – Acelerações de pico no ponto 4 – MC3	90
Figura 7.43 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC3.....	91
Figura 7.44 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC3	91
Figura 7.45 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 3 – MC3.....	92
Figura 7.46 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC4	93
Figura 7.47 – Acelerações de pico no ponto 1 – MC4	93
Figura 7.48 – Acelerações de pico no ponto 2 – MC4	93
Figura 7.49 – Acelerações de pico no ponto 3 – MC4	94
Figura 7.50 – Acelerações de pico no ponto 4 – MC4	94
Figura 7.51 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC4.....	95
Figura 7.52 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC4	95
Figura 7.53 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 1 – MC4.....	96
Figura 7.54 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC5	96
Figura 7.55 – Acelerações de pico no ponto 1 – MC5	97
Figura 7.56 – Acelerações de pico no ponto 2 – MC5	97
Figura 7.57 – Acelerações de pico no ponto 3 – MC5	97
Figura 7.58 – Acelerações de pico no ponto 4 – MC5	98
Figura 7.59 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC5.....	98
Figura 7.60 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC5	99
Figura 7.61 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 1 – MC5.....	99
Figura 7.62 – Resposta transiente inicial e permanente para o ponto 2 – MC5, $f = 2,55\text{Hz}$	102
Figura 7.63 – Transformada de Fourier para o ponto 2 – MC5, $f = 2,55\text{Hz}$	102
Figura 7.64 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a $4,95\text{Hz}$ e $\mu=0,001$	110
Figura 7.65 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a $4,95\text{Hz}$ e $\mu=0,001$	110
Figura 7.66 – Locação dos AMS para frequência de sintonização próxima de $4,95\text{Hz}$..	111
Figura 7.67 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a $4,95\text{Hz}$ e $\mu=0,001$	111
Figura 7.68 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a $5,067\text{Hz}$ e $\mu=0,001$	113
Figura 7.69 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a $5,067\text{Hz}$ e $\mu=0,001$	113

Figura 7.70 – Locação dos AMS para frequência de sintonização próxima de 5,07Hz, 5,10Hz e 5,12Hz	114
Figura 7.71 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,001$	114
Figura 7.72 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,001$	115
Figura 7.73 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,001$	116
Figura 7.74 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,001$	116
Figura 7.75 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,001$	117
Figura 7.76 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,001$	118
Figura 7.77 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,001$	118
Figura 7.78 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$	120
Figura 7.79 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$	120
Figura 7.80 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$	120
Figura 7.81 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$	121
Figura 7.82 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$	122
Figura 7.83 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$	122
Figura 7.84 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$	123
Figura 7.85 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$	124
Figura 7.86 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$	124
Figura 7.87 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$	125
Figura 7.88 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$	126
Figura 7.89 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$	126
Figura 7.90 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$	127
Figura 7.91 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$	128

Figura 7.92 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$	128
Figura 7.93 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,00025$	129
Figura 7.94 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$	130
Figura 7.95 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$	130
Figura 7.96 – Localização dos AMS para os estudos 11 e 12.....	132
Figura 7.97 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e 5,12Hz e $\mu=0,0005$	132
Figura 7.98 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz; 5,12Hz e $\mu=0,0005$	133
Figura 7.99 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz; 5,12Hz e $\mu=0,0005$	133
Figura 7.100 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e 5,12Hz e $\mu=0,00025$	134
Figura 7.101 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz; 5,12Hz e $\mu=0,00025$	135
Figura 7.102 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz; 5,12Hz e $\mu=0,0005$	135
Figura 7.103 – Localização dos AMSM para os estudos 13 a 16	137
Figura 7.104 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$	137
Figura 7.105 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz $\mu=0,0005$	138
Figura 7.106 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$	138
Figura 7.107 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$	140
Figura 7.108 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$	140
Figura 7.109 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$	140
Figura 7.110 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$	142
Figura 7.111 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz $\mu=0,00025$	142
Figura 7.112 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$	142
Figura 7.113 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$	144
Figura 7.114 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$	144

Figura 7.115 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$	144
Figura 7.116 – AMS utilizados no Mineirão, Belo Horizonte	145
Figura 7.117 – Croquis dos AMS e AMSM propostos	146
Figura A.1 – 9º modo de vibração – $f = 5,71\text{Hz}$ – Torção e flexão da arquibancada superior	172
Figura A.2 – 10º modo de vibração – $f = 6,31\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada superior e pilares	172
Figura A.3 – 11º modo de vibração – $f = 6,66\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada superior....	173
Figura A.4 – 12º modo de vibração – $f = 6,67\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada superior....	173
Figura A.5 – 13º modo de vibração – $f = 6,77\text{Hz}$ – Flexão das arquibancadas superior e inferior	174
Figura A.6 – 14º modo de vibração – $f = 6,78\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada inferior.....	174
Figura A.7 – 15º modo de vibração – $f = 6,87\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada inferior e superior	175
Figura A.8 – 16º modo de vibração – $f = 7,08\text{Hz}$ – Flexão das arquibancadas.....	175
Figura A.9 – 17º modo de vibração – $f = 7,31\text{Hz}$ – Flexão dos pisos intermediários.....	176
Figura A.10 – 18º modo de vibração – $f = 7,32\text{Hz}$ – Flexão do piso intermediário e arquibancada superior.....	176
Figura A.11 – 19º modo de vibração – $f = 7,58\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada inferior...	177
Figura A.12 – 20º modo de vibração – $f = 7,61\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada superior..	177
Figura A.13 – Construção das arquibancadas do Estádio Nacional	203
Figura A.14 – Seção transversal da bancada – medidas em cm	203

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

- A : Área da seção transversal da bancada pré-moldada;
- ALS : Amortecedores Líquidos Sintonizados;
- AMS : Amortecedores de Massa Sintonizados;
- $AMSM$: Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos;
- a : Aceleração em um tempo qualquer;
- a_{comb} : Aceleração combinada ponderada (RMS);
- a_{eq} : Aceleração equivalente (RMS);
- a_{ef} : Aceleração efetiva;
- a_w : Aceleração ponderada;
- a_{wn} : Aceleração ponderada (RMS);
- a_{wx} : Aceleração ponderada no eixo x (RMS);
- a_{wy} : Aceleração ponderada no eixo y (RMS);
- a_{wz} : Aceleração ponderada no eixo z (RMS);
- b_w é a largura da peça;
- C : Constante de amortecimento do sistema principal;
- c : Constante de amortecimento do sistema secundário;
- c_i : Amortecimento de cada AMSM;
- \mathbf{C} : Matriz $N \times N$ de amortecimento do sistema principal;
- \mathbf{c} : Matriz $Z \times Z$ de amortecimento do sistema secundário;
- c_c : Amortecimento crítico;
- CD : Coeficiente de defasagem;
- d : Altura útil da peça, igual a 1,18 m
- Ecs : Módulo de elasticidade secante;
- f : Frequência do AMS;
- $F(t)$: Excitação dinâmica;
- $\mathbf{F}(t)$: Vetor de Excitação dinâmica;
- $F(t)_{max}$: Valor de pico da força dinâmica;
- f_{adm} : Flecha máxima admissível;
- f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto;
- f_{ct} : Resistência à tração direta do concreto;
- FDN : Razão entre a força dinâmica e o peso do indivíduo;

f_1 : Frequência fundamental da estrutura;
 f_{2h} : Frequência do segundo harmônico do carregamento;
 f_{crit} : Frequência crítica;
 f_p : Frequência da atividade;
 f_n : Enésima frequência natural da estrutura;
 f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto;
 f_{cd} Resistência de cálculo à compressão do concreto
 f_{final} : Fecha que a viga atingirá no fim da vida útil;
 f_0 : Flecha inicial do elemento estrutural;
 f_{0pp} : Flecha inicial do elemento estrutural devido ao peso próprio;
 f_{0sc} : Flecha inicial do elemento estrutural devido à sobrecarga;
 f_{0p} : Flecha inicial do elemento estrutural devido ao peso do AMS;
 G : Peso do indivíduo;
 $G\alpha_i$: amplitude de força do i -ésimo harmônico;
 i : Número do harmônico;
 I : Momento de inércia da seção;
 K : Rigidez do sistema principal;
 k : Rigidez do sistema secundário;
 \mathbf{K} : Matriz $N \times N$ de rigidez do sistema principal;
 \mathbf{k} : Matriz $Z \times Z$ de rigidez do sistema secundário;
 k_p : Coeficiente de impacto;
 L : Vão do elemento estrutural;
 M : Massa do sistema principal;
 m : Massa do sistema secundário;
 m_i : Massa de cada AMSM;
 \mathbf{M} : Matriz $N \times N$ de massa do sistema principal;
 \mathbf{m} : Matriz $Z \times Z$ de massa do sistema secundário;
 M_p : Momento fletor devido ao AMS;
 M_{pp} : Momento fletor devido ao peso próprio;
 M_{sc} : Momento fletor devido à sobrecarga;
 M_r : Momento de fissuração;
 MEF : Método dos Elementos Finitos;
 N : Quantidade de graus de liberdade do sistema principal;

P : Peso por do AMS;
 P_p : Peso por metro da seção da bancada;
 q : Carga uniformemente distribuída;
 R_{max} : Amplitude máxima da resposta no domínio da frequência;
 RMS : *Root Mean Square*;
 S_c : Peso por metro devido à sobrecarga, já levando em conta o coeficiente de impacto;
 T_n : Período de tempo em que se verifica a aceleração efetiva;
 t : Tempo;
 t_c : Tempo de contato com a estrutura;
 T_p : Período da atividade;
 V_{sd} Esforço cortante de cálculo da bancada;
 V_{pp} : Esforço cortante devido ao peso próprio;
 V_{Rd2} : Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína da biela;
 V_{sc} : Esforço cortante devido à sobrecarga;
 V_p : Esforço cortante devido ao peso do AMS;
 ω : Frequência angular do AMS;
 ω_m : Frequência média dos AMSM;
 ω_i : Frequência de cada AMSM;
 W_p : Momento resistente da seção
 $y_1(t)$: Deslocamento do sistema principal;
 $\dot{y}_1(t)$: Velocidade do sistema principal;
 $\ddot{y}_1(t)$: Aceleração do sistema principal;
 $y_2(t)$: Deslocamento da massa do AMS em relação à base;
 $\dot{y}_2(t)$: Velocidade do AMS em relação à base;
 $\ddot{y}_2(t)$: Aceleração do AMS em relação à base;
 $\mathbf{y}_1(t)$: Vetor de deslocamentos do sistema principal;
 $\dot{\mathbf{y}}_1(t)$: Vetor de velocidades do sistema principal;
 $\ddot{\mathbf{y}}_1(t)$: Vetor de acelerações do sistema principal;
 $\mathbf{y}_2(t)$: Vetor de deslocamentos das massas do AMS em relação à base;
 $\dot{\mathbf{y}}_2(t)$: Vetor de velocidades das massas do AMS em relação à base;
 $\ddot{\mathbf{y}}_2(t)$: Vetor de acelerações das massas do AMS em relação à base;
 Z : Quantidade de AMS instalados no sistema;
 α : Razão de frequências do AMSM;

α_i : Coeficiente de Fourier do i-ésimo harmônico;

α_f : Quantidade que a flecha aumenta durante a vida útil da estrutura

$\alpha_{ótimo}$: Razão ótima de frequência entre o AMS e o sistema principal;

α_{v2} : Multiplicador para cálculo de cisalhamento resistente da viga;

β : Largura de banda;

μ : Razão de massa entre o AMS e o sistema principal;

φ_i : Ângulo de fase do i-ésimo harmônico em relação ao primeiro;

π : Constante Pi;

ε : Razão de amortecimento do AMS;

ε_{est} : Razão de amortecimento da estrutura em relação ao amortecimento crítico;

Δ_t : Intervalo de integração.

$\Delta\xi$: Coeficiente que varia com a idade da estrutura, necessário para o cálculo da fluência do material

ρ' : Taxa de armadura de compressão

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As arquibancadas de estádios de futebol são estruturas sujeitas a carregamentos cíclicos face às atividades rítmicas humanas que nelas se desenvolvem, situação que muitas vezes acarreta em problemas de vibrações excessivas. Diversas publicações relatam sobre essa situação, mencionando desde o desconforto dos usuários até a interdição de algumas estruturas.

D'Ambra *et al* (1997) mencionam problemas de desconforto de usuários devido a grandes oscilações e acelerações nos estádios do Maracanã, do Grêmio de Porto Alegre e do Morumbi.

A interdição do estádio Castelão pelas constantes reclamações dos usuários em relação às vibrações das arquibancadas é citada por Rodrigues (2003). O estádio teve que passar por reforma para que o problema fosse sanado. A solução foi a inserção de tirantes que ligaram as extremidades das arquibancadas até blocos de ancoragem no solo.

Sacks *et al* (2005) discorrem sobre a solução dada ao problema de vibração do Soldier Field Stadium, de Chicago. Os autores comentam que os projetistas se depararam com uma dificuldade peculiar quando foram projetar a reforma do estádio. Em função de questões históricas, a fachada do estádio deveria ser mantida, não sendo possível introduzir novos pilares para o sustento da nova estrutura. A solução geométrica é resolvida com a adoção de uma estrutura metálica em balanço para sustento das arquibancadas. Após a verificação dos níveis de conforto, conclui-se pela necessidade do controle de vibração. Para a solução, são introduzidos vinte e um AMS nas pontas dos balanços da nova estrutura.

Os problemas de vibração do Estádio do Mineirão, em Belo Horizonte, são lembrados por Silva (2012). A instalação de 176 AMS nas arquibancadas para adequação da estrutura foi necessária para a redução das acelerações nas arquibancadas, face à necessidade de adequação do Estádio para a Copa do Mundo ocorrida no Brasil, em 2014.

O SENGECE (2013) noticia a interdição do Estádio Engenhão, no Rio de Janeiro, devido a problemas de vibração na estrutura metálica da cobertura. O estádio ficou interditado de

Março de 2013 até Fevereiro de 2015 e só foi liberado após a realização do reforço dos arcos metálicos da cobertura.

Lima (2013) apresenta um estudo das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília, com o intuito de verificar os níveis de conforto dos usuários quando as arquibancadas são submetidas aos carregamentos oriundos de atividades rítmicas humanas. O autor realiza a análise dinâmica das arquibancadas com a aplicação de diversos carregamentos que representam os saltos dos usuários, simulando as situações mais prováveis de carga e analisando-as quanto ao conforto proporcionado. Em sua conclusão, comenta que as respostas se mostram aceitáveis em boa parte da estrutura, porém, em cerca de 25% delas as acelerações resultantes ultrapassam os limites estabelecidos.

Campista (2015) também apresenta um estudo das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília. É realizado um estudo com modelagens de carregamento dinâmico distintas, propostas por diferentes autores, de onde se verifica que os diferenciados modelos de carga acarretam em alterações consideráveis nas respostas da estrutura. A estudiosa analisa os resultados em termos de aceleração de pico, em *RMS* e em Valores de Doses de Vibração (VDV) e os compara aos principais normativos existentes. A investigadora comenta que existe a possibilidade de o público experimentar situações de desconforto, visto que em cerca de 25% dos resultados de aceleração de pico e em VDV, os valores ultrapassaram os limites estabelecidos para algumas das normas verificadas. Por fim, a autora sugere o estudo de sistemas de controle de vibração estruturais e a análise do desempenho da aplicação destes dispositivos nas arquibancadas do estádio.

1.2. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo a proposição do controle de vibração da arquibancada existente no setor 4G do Estádio Nacional de Brasília em continuidade aos trabalhos desenvolvidos por Lima (2013) e Campista (2015), que investigaram o comportamento dinâmico da estrutura.

Para a sua realização, propõe-se fazer um estudo detalhado de configurações de carregamentos específicos e de disposições de AMS e AMSM, com o intuito de reduzir os níveis de vibração a valores aceitáveis quando comparados aos normativos vigentes, levando em conta a otimização das massas dos dispositivos de atenuação.

1.3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada na análise numérica e controle de vibração da arquibancada existente no setor 4G do Estádio Nacional é a seguinte:

A modelagem estrutural adotada é a mesma utilizada por Lima (2013), cujos parâmetros geométricos e dos materiais foram obtidos do projeto estrutural do estádio.

Para a simulação da torcida são aplicadas cargas cíclicas com quinze frequências de carregamentos distintas e cinco distribuições diferentes de torcedores na arquibancada, com o intuito de se verificar as frequências e distribuições de torcedores que apresentem as situações mais críticas de vibrações. Além disso, é verificada a influência da parcela do carregamento horizontal no sentido tangencial, proposta por Rodrigues (2003). A realização dos estudos é feita com modelos de carga cujas formas e parâmetros são balizados por normativos e estudiosos da área.

Em função dos resultados obtidos é tomado o caso com maior nível de aceleração de pico e então são realizados estudos de atenuação com a inserção de AMS e AMSM na estrutura. Os níveis de vibração são reduzidos e os resultados obtidos são comparados com os principais normativos e bibliografias que tratam do assunto.

Por fim são realizadas averiguações da arquibancada para as situações menos críticas anteriormente estudadas, tendo como base a solução que apresenta a menor massa dos dispositivos de atenuação que reduz as acelerações a níveis aceitáveis. O propósito desta etapa é a verificação da eficácia dos dispositivos para todas as situações de carga estudadas.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é dividido em oito capítulos, sendo o primeiro de introdução ao assunto.

Na sequência é apresentado um resumo do conteúdo de cada um:

O segundo capítulo é composto por uma revisão bibliográfica que abrange estudos de vibração realizados em estruturas sujeitas a atividades rítmicas humanas, as passarelas, pisos e arquibancadas. Em uma segunda parte são apresentados os tipos de amortecedores normalmente utilizados para redução dos níveis vibracionais e, por fim, são mostrados alguns casos de controle de vibração utilizados nos três tipos estruturais descritos.

O terceiro capítulo aborda o embasamento teórico do assunto. É mostrada a formulação matemática do problema estudado, desde sua forma mais simples, em uma estrutura com apenas um grau de liberdade e um AMS instalado até a forma generalizada, com N graus de liberdade em conjunto com os AMSM. Expõe-se ainda sobre os parâmetros ótimos dos AMS e AMSM conforme Den Hartog e Jangid respectivamente. Logo após são apresentadas formulações matemáticas para os carregamentos dinâmicos onde ocorre a perda de contato entre o público e a estrutura.

O quarto capítulo discorre sobre as principais normas e critérios existentes no que tange o estudo de vibrações e os limites para o conforto humano.

O quinto capítulo explica a ferramenta computacional utilizada, bem como os elementos finitos adotados e os tipos de análises realizadas.

No sexto capítulo é exibida uma pequena descrição da arquibancada estudada e a importância do estádio para a realização da Copa das Confederações, em 2013, e Copa do Mundo de Futebol em 2014.

O sétimo capítulo apresenta a modelagem estrutural, os tipos e quantidades de elementos adotados e as condições de contorno aplicadas. Logo após é apresentada a análise modal da estrutura, seguido pelos carregamentos utilizados, compreendendo o formato da curva de carga, o coeficiente de impacto, o coeficiente de defasagem, o tempo de contato entre o público e a arquibancada e as frequências de excitação. Em seguida é realizado um estudo para a verificação dos casos mais críticos de carga, levando em conta várias frequências de carregamento e diversas disposições da torcida na arquibancada, sendo então selecionado um dos casos mais críticos para a realização do estudo de atenuação. São verificadas diversas disposições de AMS e AMSM e a eficácia dos dispositivos na redução dos níveis de vibração da estrutura. Encontrada a solução que apresenta a menor massa de amortecedores e a maior redução de vibração para o caso de carregamento selecionado, realiza-se uma verificação da estrutura com essa configuração de dispositivos de atenuação para as condições de carregamento menos críticas estudadas, com o intuito de verificar se há benefícios ou não em se instalar os amortecedores também para essas configurações de carga.

O oitavo capítulo fecha o trabalho, com a apresentação das conclusões obtidas e as sugestões para estudos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os avanços alcançados na Engenharia Civil no tocante a Análise Estrutural aliados ao aparecimento de novas técnicas construtivas e novos materiais de construção mais leves e resistentes têm tornado as estruturas cada vez mais leves, esbeltas e flexíveis, fatos estes que têm colaborado bastante para o agravamento das vibrações nas estruturas (Sommer, 2002; Gomes, 2006; Lima, 2007; Dos Santos, 2009; Lima, 2013; Campista, 2015).

De Paula e Queiroz (1998) e Lima (2007) apresentam uma situação corriqueira que muitas vezes acarreta em vibrações estruturais excessivas, onde estruturas inicialmente projetadas para receber cargas estáticas apresentam problemas ao receber carregamentos dinâmicos oriundos de atividades rítmicas humanas.

Nobrega (2004) atenta para outro ponto que pode gerar agravamento das vibrações estruturais, ao citar as técnicas de protensão que permitem estruturas mais flexíveis e com menor amortecimento.

Lima (2013) ainda levanta outra situação ao comentar sobre a mudança de comportamento dos torcedores nos jogos de futebol. Segundo o pesquisador, no início do século XX o público acompanhava os jogos sentados e aplaudiam apenas torcendo seus lenços, entretanto, nos dias de hoje é bastante comum encontrar torcidas organizadas que cantam, batem palmas e pulam no ritmo das canções que as incentivam.

A utilização de amortecedores tem se mostrado bastante eficaz no controle de vibrações estruturais. Sacks *et al* (2005) discorrem sobre a solução dada ao problema de vibração do Soldier Field Stadium, de Chicago, com a instalação de 21 AMS nos balanços das arquibancadas. Já Lima (2007), Dos Santos (2009) e Martins (2011) apresentam estudos de atenuação de vibração em pisos e salas de academia com o uso de AMS e AMSM, enquanto Silva (2012) comenta sobre a recente reforma no Estádio do Mineirão, onde foi necessária a instalação de 176 AMS nas arquibancadas para adequação da estrutura do Estádio para a Copa do Mundo ocorrida no Brasil, em 2014.

2.2. VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR ATIVIDADES RÍTMICAS HUMANAS

As lajes de academias e de casa de shows, as passarelas e as arquibancadas são exemplos comuns de estruturas sujeitas a problemas de conforto, face às vibrações induzidas por atividades rítmicas humanas. Por essa razão, o desenvolvimento de pesquisas sobre o tema é bastante comum no meio acadêmico. Apresenta-se a seguir uma breve descrição de alguns desses estudos.

2.2.1. Vibrações Induzidas em Passarelas

Barros (2009) realiza um estudo numérico via Método dos Elementos Finitos (MEF) de uma passarela estaiada a ser implantada sobre a BR-116 no município de Esteio, no Rio Grande do Sul, conforme indica a Figura 2.1. O autor faz primeiramente a análise de vibração livre da estrutura a fim de obter as suas primeiras frequências e os seus respectivos modos de vibração. Em uma segunda etapa o modelo é submetido aos carregamentos forçados produzidos por pedestres caminhando, correndo e pulando sobre as lajes do piso. O pesquisador conclui que a passarela possui alta flexibilidade e conseqüentemente uma resposta insatisfatória no que tange ao conforto dos usuários, ainda que a estrutura tenha sido considerada segura para os carregamentos estudados.

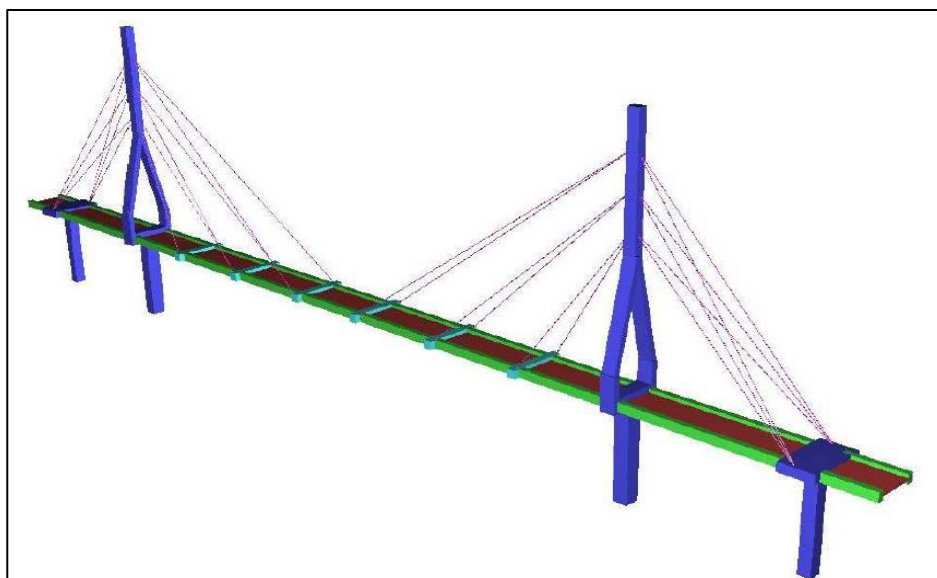


Figura 2.1 – Modelo discretizado da passarela estaiada sobre a BR-116 – Barros (2009)

Silva (2009) apresenta o estudo de uma passarela sobre a Linha Vermelha na cidade do Rio de Janeiro, mostrada na figura 2.2. O autor desenvolve um modelo numérico via MEF e confronta os resultados obtidos com os oriundos do monitoramento da estrutura. De posse dos dados experimentais, o modelo numérico é atualizado de maneira a se

ajustar ao real funcionamento da ponte pedonal, que então é submetida ao carregamento forçado. O autor compara os resultados obtidos com indicações da literatura e conclui que a passarela é bastante rígida e apresenta bom nível de conforto, não sendo necessária a instalação de qualquer dispositivo de controle.



Figura 2.2 – Passarela sobre a Linha Vermelha – Silva (2009)

Segundinho (2010) estuda modelos de passarelas de madeira simplesmente apoiadas com o intuito de propor recomendações de projeto para conforto humano. O autor faz um estudo analítico, numérico e experimental dos modelos e conclui que a formulação de Euler-Bernouli é adequada para o cálculo da primeira frequência natural nas direções transversal vertical e transversal horizontal das passarelas, entretanto, chama atenção para a importância da verificação da rigidez à flexão na direção transversal horizontal, ressaltando que nem todas as normas a indicam. Finaliza com a apresentação de uma proposta de verificação do estado limite de serviço devido às vibrações induzidas por usuários no tocante ao cálculo de frequências e acelerações, a ser inserida em uma futura revisão da norma brasileira de projeto de estruturas de madeira – NBR 7190 (1997).

2.2.2. Vibrações Induzidas em Pisos

De Paula e Queiroz (1998) investigam o piso de uma casa de espetáculos inicialmente calculado para receber carregamentos estáticos. A estrutura composta por vigas de aço e lajes de concreto foi analisada em um programa computacional via MEF, tendo sido os resultados obtidos para as suas frequências naturais comparados aos valores experimentais medidos. A carga dinâmica foi simulada através de carregamentos

harmônicos com a consideração da frequência básica de excitação e alguns de seus múltiplos.

Apesar de ser considerada segura pelos autores, foram detectados alguns pontos com níveis de aceleração acima dos limites recomendados para atender aos critérios de conforto ao público, fato que os levou a apresentar algumas propostas de reforços de maneira a adequar a estrutura à sua nova finalidade.

Sommer (2002) apresenta outra pesquisa via MEF de pisos mistos de aço/concreto sujeitos a carregamentos oriundos de atividades rítmicas humanas. Para a realização do estudo, as lajes são modeladas por elementos de placa e as vigas por elementos de barra tridimensionais, com a garantia da interação entre ambos. As figuras 2.3 e 2.4. ilustram os dois exemplos abordados pela pesquisadora.

Em sua análise, a autora comenta sobre a pequena variação dos esforços solicitantes face aos oriundos da análise estática, porém, chama a atenção para as acelerações obtidas em alguns pontos da estrutura pesquisada, cujos valores superaram os limites recomendados para garantir o conforto humano.

A pesquisadora apresenta ainda uma comparação dos resultados obtidos pelo MEF, contendo diversos graus de liberdade, aos oriundos de uma análise simplificada, com apenas um grau de liberdade. Como resultado, conclui que a análise simplificada mostrou-se válida apenas para se realizar um pré-dimensionamento do sistema, e salienta sobre a importância de se realizar uma análise dinâmica completa para a obtenção de resultados mais confiáveis.

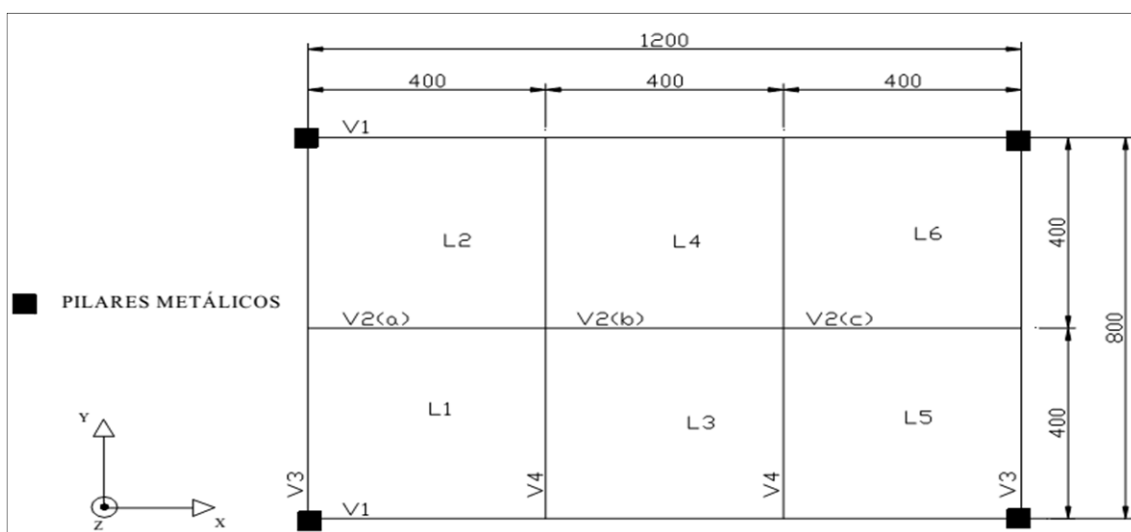


Figura 2.3 – Croquis do primeiro modelo estudado por Sommer – Sommer (2002)

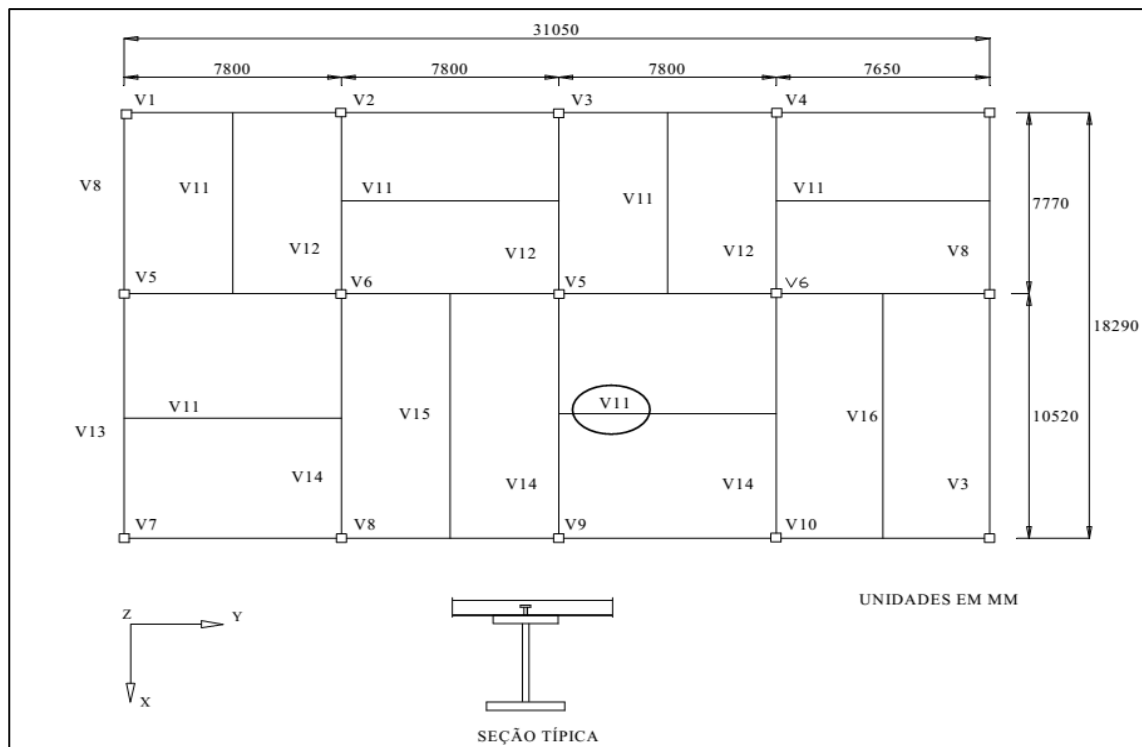


Figura 2.4 – Croquis do segundo modelo estudado por Sommer – Sommer (2002)

Da Silva *et al* (2014) realizam análise numérica de um piso misto de aço e concreto com vãos de 40 m x 40 m destinado a uma academia de ginástica. No trabalho são considerados três tipos de ligação entre os elementos metálicos (vigas x vigas e vigas x pilares), a rígida, a semirrígida e a flexível, enquanto que para as lajes x vigas são adotadas seis configurações distintas de conexão. Os autores ainda validam o modelo estrutural para as ligações semirrígidas, através de dados experimentais obtidos para o diagrama momento x curvatura.

Para a simulação das cargas dinâmicas é considerada a atuação de 32 pessoas saltando no piso através de três modelos distintos, o MC1, sugerido por Faísca (2003), o MC2, que considera uma distribuição espacial e temporal do carregamento, porém, desconsidera a defasagem entre os harmônicos da carga e o MC3, que é semelhante ao segundo, porém, levando em conta a defasagem dos referidos harmônicos. Para a consideração do amortecimento natural é considerada a formulação de Rayleigh, conforme mostra Clough et al (2003). As acelerações de pico são tomadas em oito distintos pontos do piso e então comparadas aos valores sugeridos pela literatura. A figura 2.5 mostra o croqui do piso estudado, bem como os pontos carregados e os oito locais de leitura das vibrações.

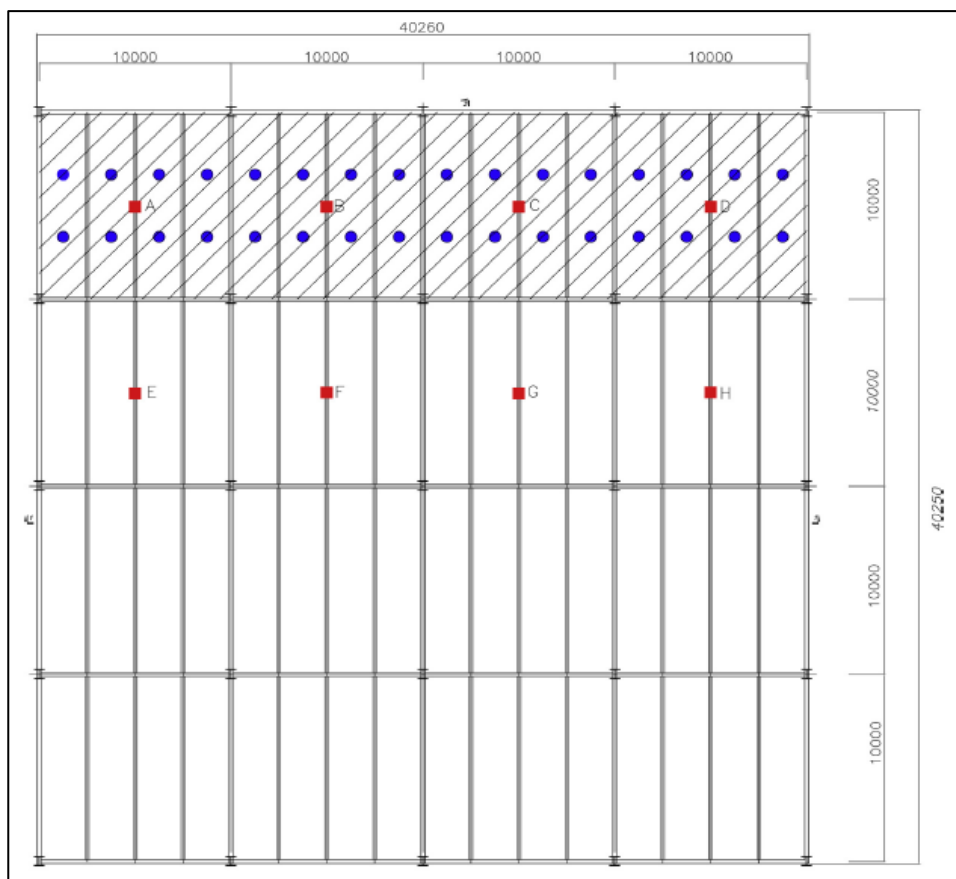


Figura 2.5 – Piso de academia estudado – Da Silva *et al* (2014)

Os autores verificam que a influência da variação na quantidade de conectores laje x viga apresentam variação de 5% a 7% nas frequências naturais do piso, porém, chamam atenção para as mudanças observadas entre as ligações rígidas e flexíveis dos elementos metálicos, tendo em vista que a redução das frequências naturais pode acarretar em aumento significativo nas acelerações do piso. Ainda com relação às diferenças entre os modelos de ligação é verificado que o piso não apresenta modificações significativas no que tange os modos de vibração, tendo em vista a predominância dos efeitos de flexão.

Com relação aos modelos de carga é verificado que o MC1 é o que apresenta resultados mais realistas, tendo em vista as considerações de defasagem e mudança de ritmo dos indivíduos. Os autores comentam ainda que o MC1 apresenta em algumas situações específicas vibrações acima da recomendada pela literatura. Por outro lado, é verificado que o modelo MC2 proporciona valores de acelerações excessivos, uma vez que não leva em conta as considerações anteriormente citadas. Já o modelo MC3 também considera a defasagem dos saltadores, porém, leva a valores de vibração abaixo do esperado e não supera os limites de vibração, provavelmente devido às frequências e coeficientes dinâmicos adotados.

2.2.3. Vibrações Induzidas em Arquibancadas

D'Ambra *et al* (1997) realizam a análise numérica da Tribuna Leste do estádio *Huracán*, (Corrientes, Argentina), mostrada na figura 2.6. São considerados dois modelos de discretização da estrutura. O primeiro modelo é um pórtico plano discretizado via MEF onde são encontradas as primeiras frequências naturais e seus respectivos modos de vibração. O mesmo procedimento é adotado para um pórtico espacial no segundo modelo. As figuras 2.7 e 2.8 ilustram, respectivamente, os dois primeiros modos de vibração obtidos para cada uma das discretizações da estrutura.

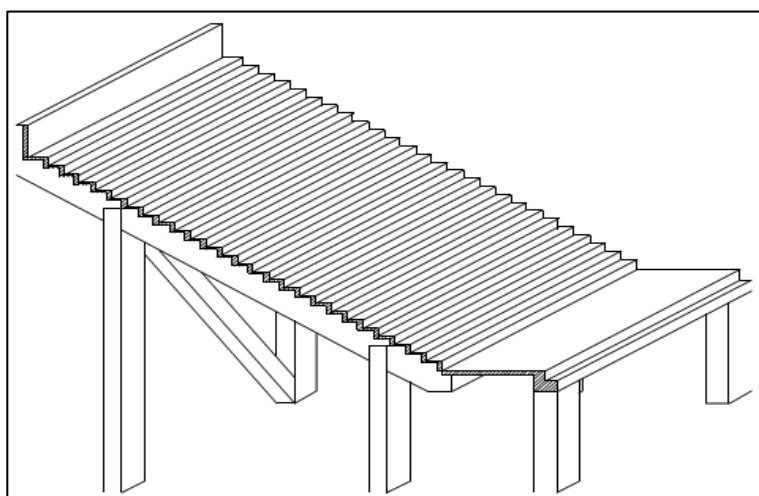


Figura 2.6 – Croqui da estrutura analisada – D'Ambra et al (1997)

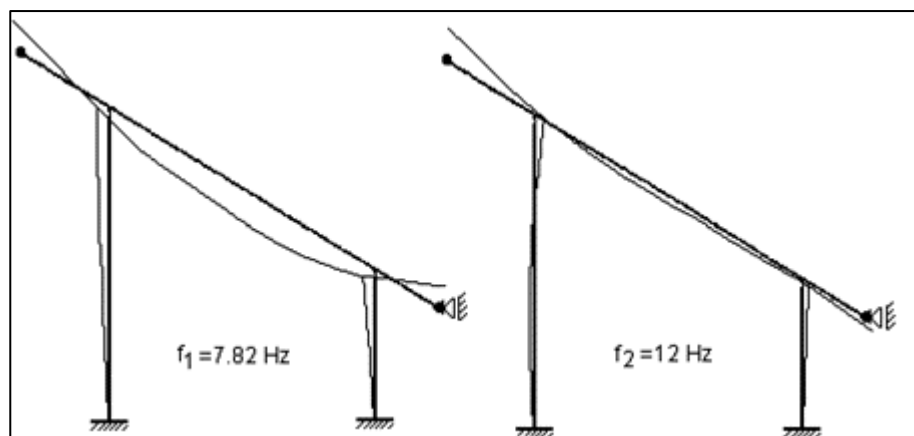


Figura 2.7 – Dois primeiros modos de vibração para pórtico plano – D'Ambra et al (1997)

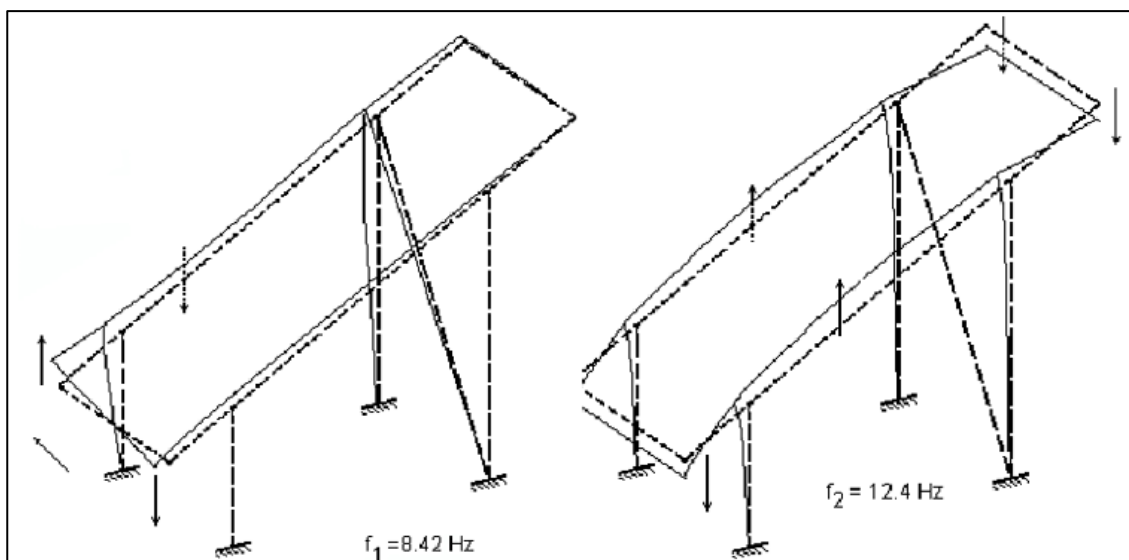


Figura 2.8 – Dois primeiros modos de vibração para pórtico espacial – D’Ambra et al (1997)

Os autores comentam sobre a influência do contraventamento lateral que impede deslocamentos tanto na vertical quanto na horizontal, explicando assim a diferença encontrada entre as frequências correspondentes ao modo de flexão vertical, de 7,82 Hz e 12,4 Hz para os modelos de pórtico plano e inclinado, respectivamente.

Além disso é mostrada a importância da discretização do pórtico espacial, visto que o primeiro modo de vibração ocorre para vibrações laterais, impossível de ser detectada em pórticos planos.

Por fim os autores comentam que a frequência fundamental da estrutura é alta e concluem pela superação da zona de risco para carregamentos oriundos de atividades rítmicas humanas.

Martins *et al* (2004) realizam um estudo via MEF do comportamento dinâmico do Estádio Algarve, construído para a realização do Campeonato Europeu de Futebol, em Faro, Portugal. O trabalho leva em conta não só o carregamento oriundo do movimento das massas humanas, mas também do efeito do sismo, bastante pronunciado na região. O estudo mostra que o estádio apresenta algumas vulnerabilidades, face à não consideração de um estudo dinâmico detalhado à época de projeto. São apresentadas recomendações de enrijecimento da estrutura com o aumento das espessuras das seções metálicas tubulares, porém, sem aumento dos diâmetros das mesmas. Os autores comentam ainda sobre a opção de colocação de amortecedores ligando a arquibancada aos núcleos de concreto armado dos acessos interiores, para a redução dos problemas de vibração. As figuras 2.9 e 2.10 ilustram o estádio estudado.



Figura 2.9 – Estádio Algarve em construção – Martins et al (2004)

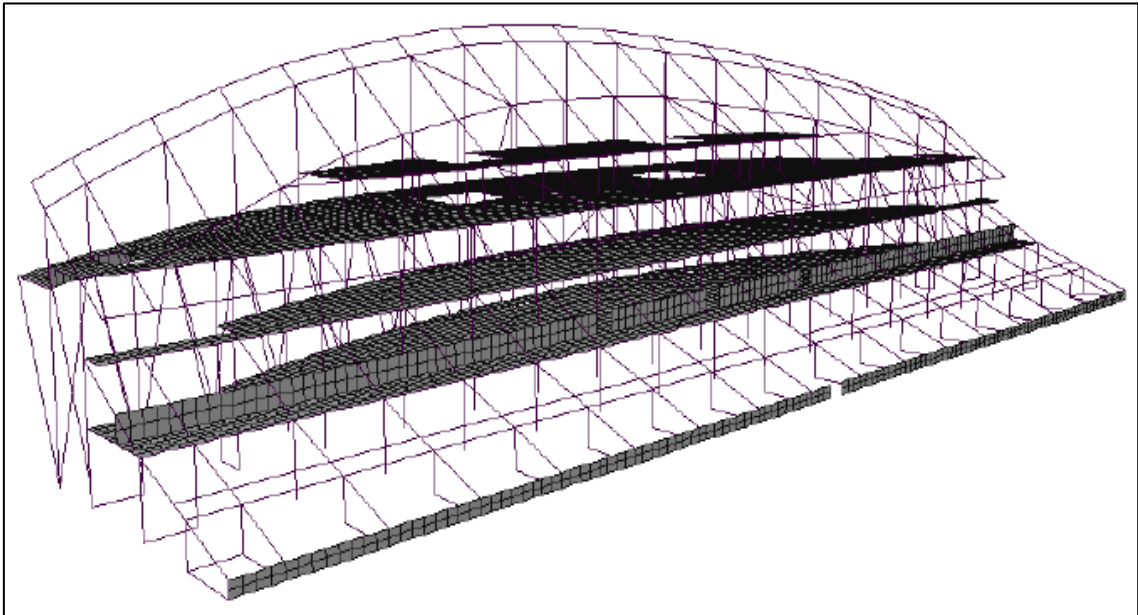
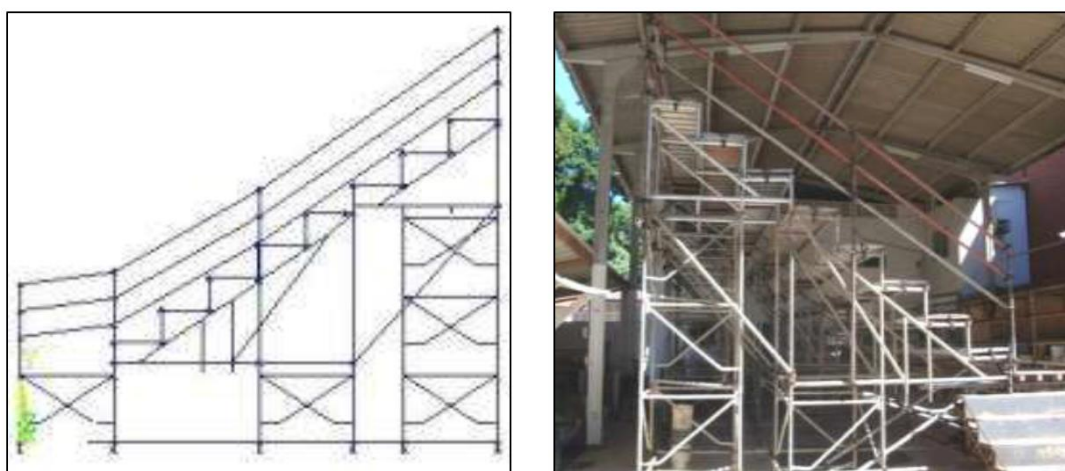


Figura 2.10 – Discretização tridimensional do modelo utilizada – Martins et al (2004)

Juliani *et al* (2005) estudaram o comportamento dinâmico das arquibancadas do Estádio Olímpico João Havelange, localizado no Rio de Janeiro. Para tanto foi realizado um estudo numérico e experimental da estrutura, construída em concreto armado pré-moldado. Os resultados das acelerações encontradas foram comparados aos limites propostos pelo CEB 209 (1991), onde foram verificados valores entre os limites “desagradável” e “intolerável”. Os autores propõem inicialmente um aumento da inércia dos degraus da arquibancada, solução que se mostra pouco eficiente. Em uma segunda proposta foi feita a ligação das peças dando continuidade ao conjunto, solução que se

mostrou mais eficaz, uma vez que o primeiro modo de vibração da estrutura se afasta da frequência de excitação do público. Entretanto, mesmo com as alterações propostas, os autores comentam que as acelerações ainda poderão ser sentidas pelo público, uma vez que para todos os casos analisados estas superam o limite de “claramente perceptível”.

Brito (2011) realiza um estudo numérico e experimental do comportamento dinâmico de uma arquibancada temporária construída em estrutura metálica, com o intuito de desenvolver e ajustar modelos numéricos que retratem de forma mais precisa a arquibancada analisada. Uma estrutura em escala real com capacidade para aproximadamente 96 pessoas é montada em um laboratório e instrumentada, tendo sido os resultados obtidos utilizados para a calibração do modelo numérico via MEF. O autor conclui que o modelo se apresenta adequado para este tipo de estudo, porém, alerta para a necessidade de um refinamento da modelagem das conexões na região das conexões das torres. Além disso, comenta sobre a necessidade de utilização de modelos biodinâmicos para uma melhor avaliação do comportamento público-estrutura. A figura 2.11 ilustra a arquibancada e o modelo discretizado adotado.



a) Modelo discretizado

b) Estrutura em escala real

Figura 2.11 – Arquibancada temporária – Brito (2011)

Lima (2013) realiza um estudo numérico de um módulo das arquibancadas do Novo Estádio Nacional de Brasília. Na primeira parte do trabalho o autor realiza uma análise modal da estrutura, dando foco aos 12 primeiros modos de vibração, enfatizando que esses são os de frequências naturais mais próximas às características de carregamentos desenvolvidos por atividades humanas. Em uma segunda parte são impostas diversas situações de carregamento, com variações nos parâmetros adotados e na ocupação das arquibancadas com o intuito de encontrar alguns dos carregamentos críticos da estrutura.

Por fim o autor faz uma comparação dos níveis de vibrações encontradas com as propostas por normativos estudados e conclui que em cerca de 25% dos casos as acelerações ultrapassam os limites de conforto estabelecidos. A figura 2.12 ilustra o modelo discretizado adotado.

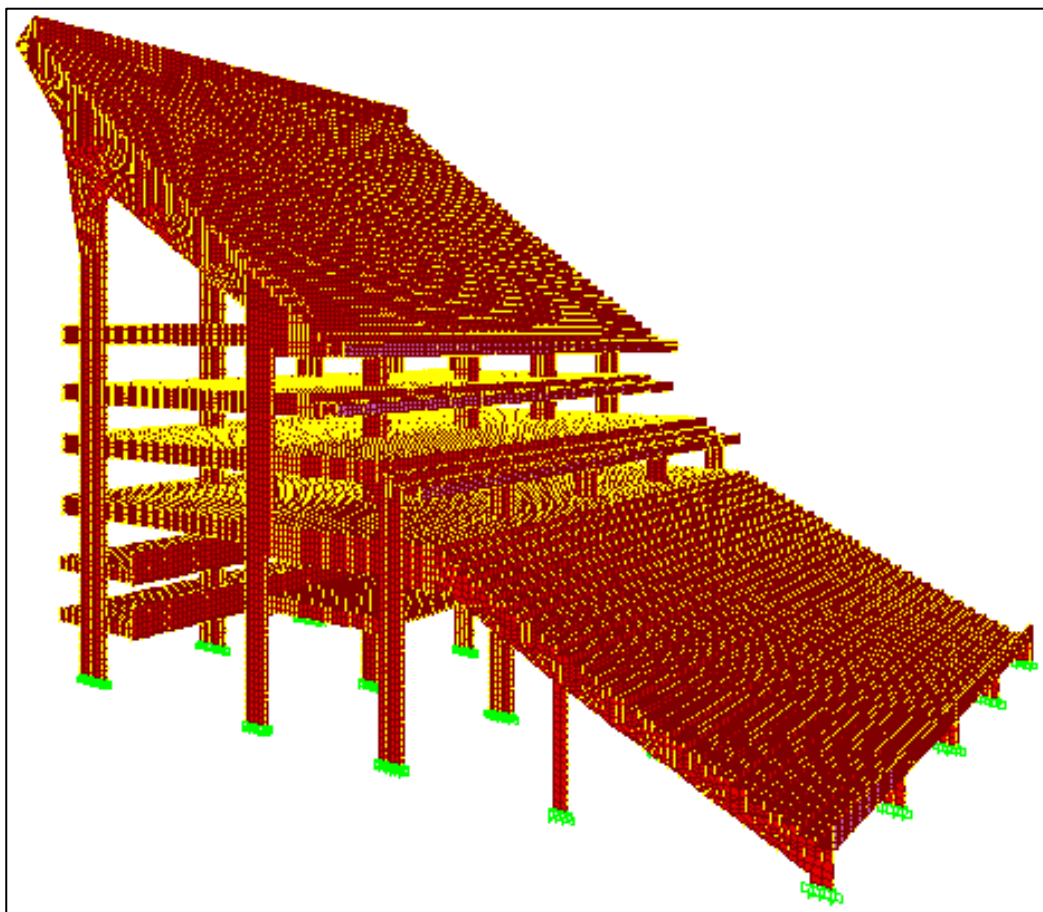


Figura 2.12 – Modelo discretizado do Estádio Nacional – Lima (2013)

As vibrações nas arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília também são analisadas por Campista (2015). No trabalho são estudados dois modelos de carregamento, o de Faisca (2003) e Ellis e Ji (2004) *apud* Campista (2015), onde os resultados obtidos são comparados aos limites propostos por normas e recomendações de projeto.

Em sua dissertação Campista (2015) adota para a vibração forçada a frequência de carregamento igual a 2,50Hz, baseada em investigações realizadas anteriormente por outros pesquisadores e também pelo fato de essa frequência se encontrar em ressonância com o terceiro modo de vibração da estrutura. Para essa frequência de carga, a estudiosa verifica que os picos de transferência de energia em relação à resposta dinâmica estrutural, em termos de acelerações, ocorre para a quinta frequência natural, cujo valor é

$f_5 = 5,09\text{Hz}$, comentando que o segundo harmônico do carregamento se encontra em ressonância com o modo citado.

Campista (2015) realiza ainda a comparação da transferência de energia para os modelos de Faisca (2003) e Ellis e Ji (2004) tendo em vista a frequência de carga de 2,50Hz. Em sua análise a autora mostra que o modelo proposto pela pesquisadora brasileira transfere menos energia ao sistema para os três primeiros picos de frequência. A figura 2.13 apresenta os resultados obtidos por Campista (2015), tendo em vista as curvas de carregamento propostas pelos dois autores para um público de 64 pessoas.

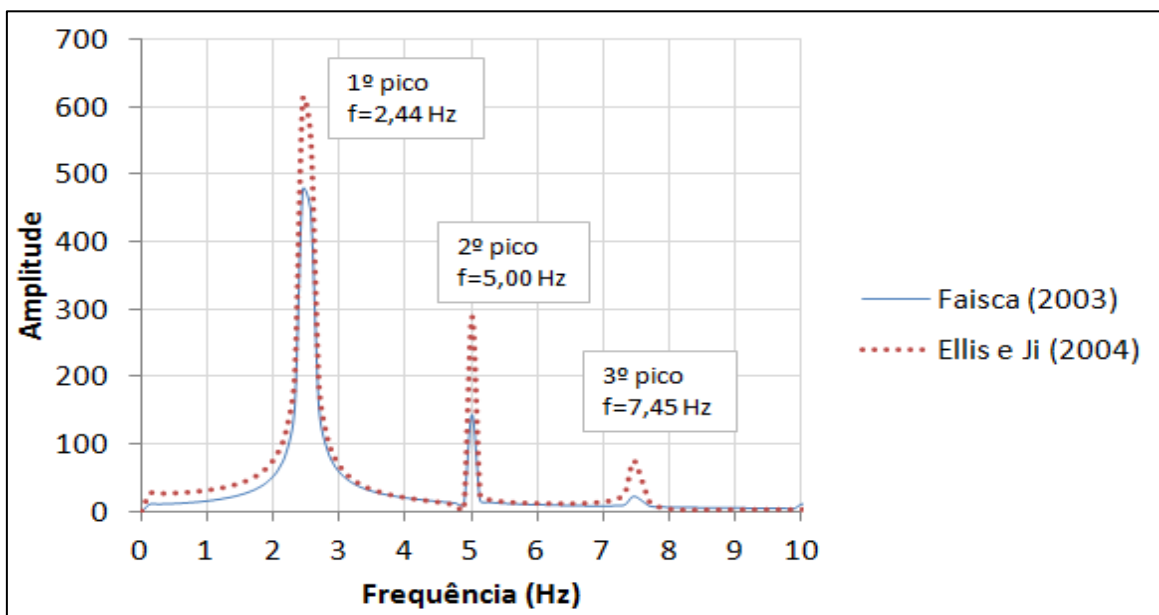


Figura 2.13 – Transformadas de Fourier para o carregamento de 64 pessoas – Campista (2015)

Em suas conclusões, a autora relata que o estádio não apresenta vibrações excessivas quando verificado pelo modelo proposto por Faisca (2003), porém, comenta que o mesmo não ocorre quando adotado o modelo de Ellis e Ji (2004). No segundo modelo de carga as acelerações em VDV e de pico superam os limites estabelecidos em cerca de 25% dos casos analisados, mostrando mais uma vez a menor quantidade de energia transferida ao sistema quando da adoção do modelo de carga da pesquisadora brasileira.

2.3. TIPOS DE AMORTECEDORES UTILIZADOS NO CONTROLE DE VIBRAÇÃO

Quando submetidas a carregamentos dinâmicos, as estruturas podem apresentar deslocamentos e acelerações excessivas e causar o desconforto dos seus usuários. Os sistemas de controle de vibração são dispositivos que atuam de forma a reduzir estas vibrações, aumentando assim o conforto daqueles que se utilizam da estrutura.

Existem atualmente diversos tipos de controle de vibração de estruturas. Soong & Dargush (1997) os classificam como Controle Passivo, Controle Ativo, Controle Semi-ativo e Controle Híbrido.

A seguir é apresentada uma breve descrição sobre os distintos dispositivos de controle.

2.3.1. Controle Passivo de Vibração

O controle passivo é um mecanismo que não necessita de energia externa para a sua atuação. Quando instalado na estrutura, atua com o fim de minimizar a energia transmitida pelo carregamento dinâmico, reduzindo assim a quantidade a ser absorvida pelo sistema principal e, então, a quantidade de vibração na estrutura. São exemplos de atenuadores passivos o Isolamento de Base, os Amortecedores Líquidos Sintonizados (ALS), os Amortecedores Viscoelásticos, os Amortecedores Viscofluidos, os Amortecedores metálicos, os Amortecedores de Fricção e os Amortecedores de Massa Sintonizados (AMS).

Amplamente adotado em estruturas sujeitas a sismos, o Isolamento de Base consiste na ideia de se reduzir os esforços estruturais oriundos de movimentações horizontais ao nível da base, através de esferas, sistemas de atrito tipo pêndulo e roldanas.

Os ALS caracterizam-se pela oscilação de um líquido dentro de um recipiente, de forma que ocorre a transferência de energia do carregamento para o dispositivo de controle, Lara (2007). O autor comenta que, segundo Ambrosini (2001), os ALS absorvem a energia de vibração pelo movimento oscilante do líquido contido no recipiente e a dissipam por meio do atrito do líquido com a superfície do recipiente.

Os Amortecedores Viscoelásticos são constituídos por chapas metálicas unidas por um material viscoelástico. A dissipação da energia advinda do carregamento dinâmico ocorre

quando o amortecedor se movimentar com as vibrações da estrutura, convertendo a energia mecânica em energia térmica, reduzindo assim as vibrações estruturais.

Os Amortecedores Viscofluidos funcionam com a dissipação da energia mecânica em calor, quando um pistão se move através de uma substância altamente viscosa, como silicone ou gel, Soong & Dargush (1997).

Os Amortecedores Metálicos atuam de forma que a energia oriunda do carregamento seja dissipada através da deformação inelástica do material. Segundo Lara (2007), estes dispositivos possuem a vantagem de poder ser construídos em todas as formas possíveis, facilitando assim o uso em estruturas espaços sem simetria.

Os Amortecedores de Fricção dissipam a energia oriunda do carregamento dinâmico através do atrito entre dois sólidos que deslizam um em relação ao outro quando o sistema principal entra em vibração.

O AMS é um sistema composto por uma mola e um amortecedor dispostos em paralelo, onde uma de suas extremidades é conectada à estrutura principal e a outra a uma massa secundária, trabalhando sintonizado a uma frequência específica da estrutura. Quando a frequência do carregamento coincide com a frequência sintonizada, grande parte da energia de vibração é transferida ao AMS, que vibra fora de fase com a estrutura, de forma que o movimento do amortecedor produza reações que contrariam o movimento do sistema principal e assim reduza a vibração estrutural.

Os AMS foram inicialmente desenvolvidos para atuarem em estruturas mecânicas sujeitas a carregamentos harmônicos, porém, com o tempo foram também adotadas em estruturas civis sujeitas a carregamentos cíclicos, como estádios de futebol, passarelas, pontes e viadutos. Embora o conceito desses dispositivos seja simples, seus parâmetros (massa, rigidez e amortecimento) devem ser obtidos de forma otimizada para que se tenha maior efetividade no controle de vibrações.

As maiores vantagens dos AMS são a capacidade de operação sem que haja energia externa, o baixo custo de instalação e manutenção quando comparado aos demais métodos e o bom desempenho quando a estrutura é excitada dentro das faixas de valores de frequência para as quais foi projetado. Em contrapartida, quando a excitação ocorre fora da faixa de sintonia, o amortecedor pode até mesmo aumentar a vibração do sistema.

2.3.2. Controle Ativo de Vibração

No controle ativo de vibração, as forças de controle provêm de uma fonte de energia externa. Para atuar de maneira correta, o sistema necessita das respostas da estrutura aos estímulos existentes, para, em função disso, gerar a correta força de controle.

Conforme Silva (2011), os sistemas ativos são exemplos de amortecedores de massa ativa, diagonais ativas e atuadores piezoelétricos.

Ao ser comparado ao sistema passivo, o ativo apresenta como vantagem a atuação em uma ampla faixa de frequência. No entanto, é mais oneroso, tanto na instalação, quanto na manutenção e na operação, tendo em vista a necessidade de energia externa para o seu funcionamento.

2.3.3. Controle Semi-ativo de Vibração

O sistema semi-ativo não adiciona energia externa à estrutura, mas atua de forma a alterar a rigidez e o amortecimento dos atenuadores de maneira a adequá-los às necessidades da ocasião. Uma vez que depende de baixa quantidade de energia externa, apenas para alterar os parâmetros dos dispositivos de amortecimento, pode trabalhar até mesmo com baterias de emergência no caso de falta de energia elétrica, Martins (2011).

O sistema semi-ativo possui a vantagem de cobrir uma maior faixa de frequência quando comparado à utilização de AMS, porém, apresenta-se mais oneroso, tanto na aquisição quanto na manutenção e operação. Já em relação ao sistema ativo apresenta a vantagem de ter custo inferior, no entanto trabalha em uma faixa de frequência inferior.

2.3.4. Controle Híbrido de Vibração

O sistema híbrido é composto por uma combinação dos sistemas passivo e ativo na mesma solução.

A vantagem desse sistema é o aumento da faixa de frequências atendidas pelo atenuador, além de requerer menor quantidade de energia que o sistema puramente ativo. No mais, em caso de falta de energia externa, a parte passiva funciona como se fosse um AMS. Por outro lado, apresenta maior custo de aquisição, instalação, manutenção e utilização, quando comparado ao sistema puramente passivo.

2.4. ESTUDOS E APLICAÇÕES DE AMORTECEDORES NO CONTROLE DE VIBRAÇÃO

2.4.1. Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos (AMSM) em Passarelas

A passarela do Millenium em Londres é bastante conhecida, não só pela sua beleza estética, figura 2.14, mas também pelos problemas de vibração ocorridos quando da sua inauguração. Aberta ao público em 10 de junho de 2000, a passarela foi rapidamente interditada face aos deslocamentos e acelerações excessivas, que chegaram a atingir 70 mm e $2,45 \text{ m/s}^2$, respectivamente. Gomes (2006) cita o estudo de Dallard *et all* (2001), que discorre sobre a correção do problema de vibração da passarela com a instalação de 37 amortecedores viscofluidos e 4 pares de AMS. Segundo o pesquisador, a solução elevou o amortecimento da estrutura reduzindo significativamente a sua resposta dinâmica.



Figura 2.14 – Passarela do Millenium, Londres – Inglaterra

<https://www.polyteck.com.br/uncategorized/millennium-bridge/> acesso em 23 de fevereiro de 2016

Gomes (2006) realiza um estudo numérico do comportamento dinâmico de uma passarela de pedestres localizada sobre a E.P.I.A. na cidade de Brasília, conforme mostra a figura 2.15. O autor faz uma análise de vibrações forçadas para carregamentos típicos de atividades humanas e verifica que a passarela apresenta vibrações excessivas quando comparadas aos limites de serviço indicados na literatura. No trabalho são apresentadas algumas propostas para a solução do problema, como a introdução de barras de travamento na estrutura e a instalação de AMSM. Foram estudados diferentes sistemas

compostos por 2, 6, 10 e 20 atenuadores com massas de 50, 100, 150 e 200 kg. Face à pequena melhora apresentada pelos amortecedores mais pesados, o autor opta pela utilização de amortecedores com massas de 150 kg e consegue reduzir as vibrações a níveis aceitáveis quando submetida a carregamentos com frequências próximas ao primeiro modo de vibração.



Figura 2.15 – Passarela sobre a E.P.I.A – Gomes (2006)

2.4.2. Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos em Pisos

Lima (2007) analisa o piso de uma academia de ginástica em um prédio comercial na cidade de Brasília, figura 2.16, cuja estrutura fora inicialmente calculada para carregamentos estáticos. O pesquisador faz a análise via MEF e encontra níveis de vibração superiores aos recomendados para esse tipo de situação. Numa tentativa de solucionar o problema é feito o enrijecimento da estrutura. Na proposta o autor consegue atender às orientações dadas pela NBR 6118 (2003) e afasta as frequências naturais da estrutura dos valores preconizados pela norma. Entretanto, por se tratar de uma solução quase inviável do ponto de vista prático, parte para a utilização de AMSM. São estudadas diversas propostas com a variação não só da quantidade, mas também das posições e propriedades dos atenuadores. O autor escolhe os nós com maiores deslocamentos para instalação dos dispositivos e consegue atingir um nível satisfatório de vibração segundo recomendações da ISO 2621/1 e 2 (1980). O investigador comenta ainda que quanto às

normas DIN 4150/2 (1975) e BRE – British Building Research Establish – Digest (1983), o limite de deslocamento estrutural fica reduzido a níveis aceitáveis durante o dia, porém, falha quando o período noturno é averiguado. Já em relação às normas CAN3 – S16 – M84 (1984) e NBR 8800 (1980) os dispositivos não são suficientes para atendimento dos requisitos mínimos de conforto.

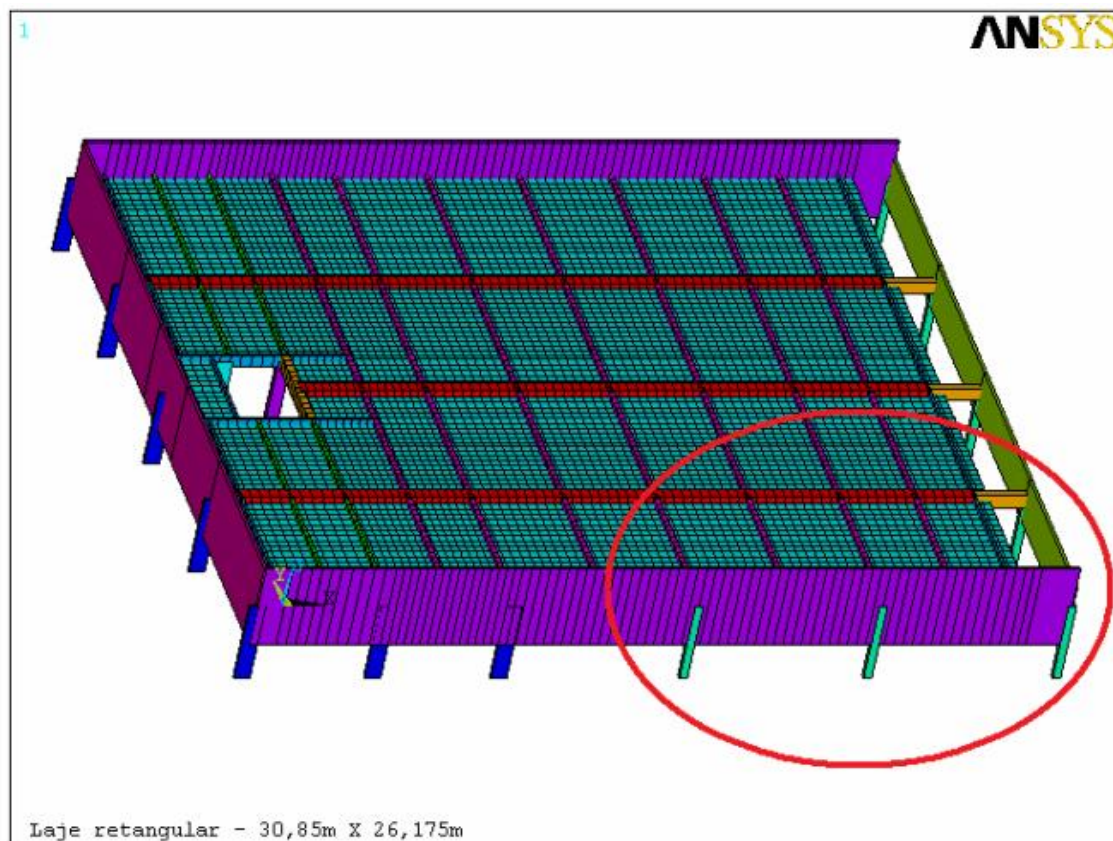


Figura 2.16 – Detalhe da estrutura estudada por Lima (2007)

Dos Santos (2009) apresenta uma pesquisa com quatro modelos de lajes contendo baixos valores de frequências naturais e susceptíveis aos efeitos de vibração. O autor apresenta um estudo paramétrico para solução otimizada com AMSM de lajes sujeitas a carregamentos cíclicos e, assim como Lima (2007), Martins (2011) e outros pesquisadores, o autor observa que os atenuadores apresentam melhor resultado quando aplicados junto ao ponto de maior amplitude modal vertical. O estudo mostra ainda que os amortecedores apresentam melhores resultados para o caso de carregamentos harmônicos, quando comparados aos oriundos de atividades rítmicas humanas, sendo a redução de 70 a 80% e 40 a 50% respectivamente. O autor comenta ainda sobre a influência da taxa de amortecimento (ϵ) no desempenho dos AMS e conclui que quanto

menor o valor do parâmetro melhor o desempenho dos dispositivos. As figuras 2.17 e 2.18 apresentam duas das soluções estudadas.

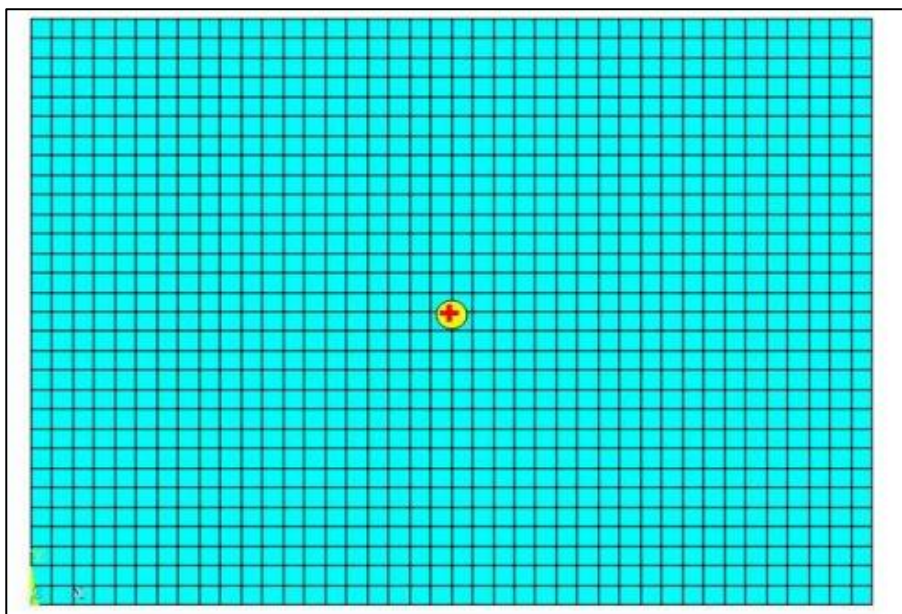


Figura 2.17 – Laje com um AMS no ponto central – Dos Santos (2009)

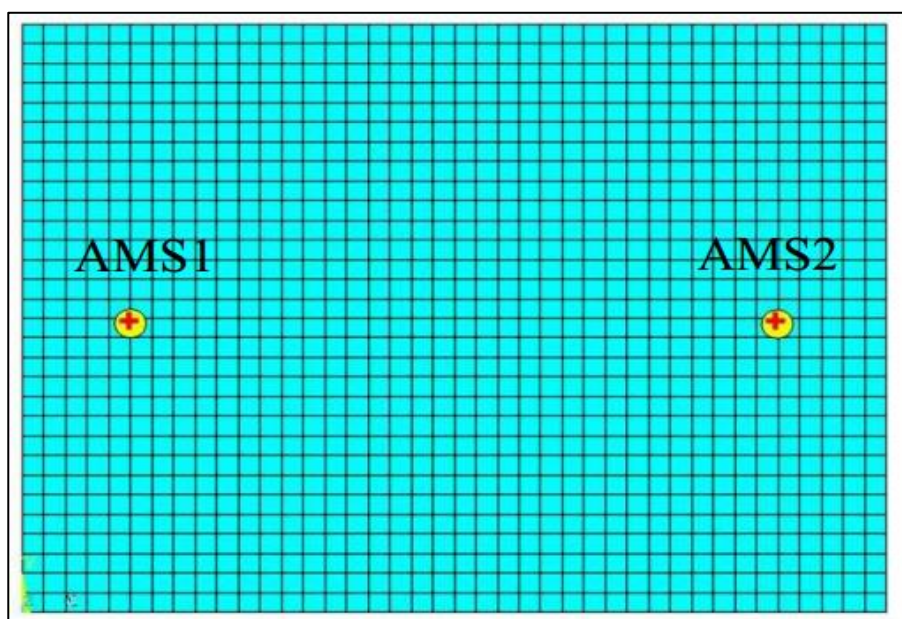


Figura 2.18 – Laje com dois AMS próximos às bordas – Dos Santos (2009)

Martins (2011) apresenta outro trabalho sobre pisos submetidos a atividades rítmicas humanas com problemas de vibração. O autor estuda uma laje sujeita a atividades rítmicas humanas de um estúdio localizado em Lisboa, Portugal. Após a modelagem e validação da estrutura, o pesquisador estuda o efeito de três casos de carregamentos com frequências de 3,4 Hz, 2,5 Hz e 1,8 Hz, considerando a parcela do tempo que o usuário

encontra-se em contato com o piso igual a 25%, 50% e 100%; e coeficiente de impacto igual a 6,28; 3,14 e 1,57, respectivamente.

Uma vez que os resultados obtidos apresentam níveis de aceleração superiores aos máximos admitidos, o pesquisador apresenta como solução o controle das vibrações através da inserção de AMSM no piso. São realizados dez estudos com os amortecedores, levando em conta a variação de quantidade, posição e parâmetros dos dispositivos e consegue reduzir as acelerações máximas na estrutura, todavia, sugere o número máximo de 11 pessoas no salão. Por fim, comenta sobre a subjetividade na aplicação das normas no tocante à análise de conforto, situação também comentada por Lima (2013).

A figura 2.19 apresenta a evolução das acelerações em função da quantidade de AMSM inseridos na laje estudada pelo pesquisador.

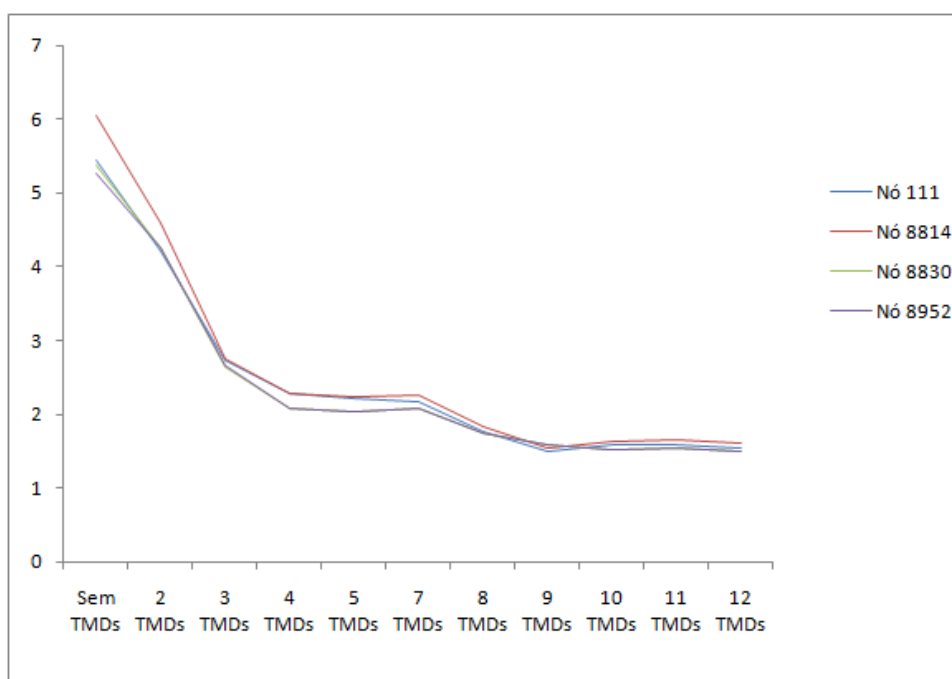


Figura 2.19 – Evolução das acelerações com incrementos de AMSM – Martins (2011)

Gaspar *et al* (2016) realizam análise numérica de um piso misto de aço e concreto com vãos de 40 m x 40 m semelhante ao estudado por Da Silva *et al* (2014) e apresentado no item 2.2.2 deste trabalho. Na modelagem é utilizada a interação completa dos elementos de aço e concreto através da inserção de elementos que simulam a ligação feita pelos conectores. O modelo considera ainda que as vigas são ligadas entre si de forma flexível, porém, de maneira rígida quando de encontro com os pilares. Para o estudo é considerada ainda a taxa de amortecimento estrutural igual a 1%.

A simulação das cargas dinâmicas é feita a partir da consideração de trinta e duas pessoas saltando no piso através do modelo de carregamento sugerido por Faísca (2003) localizadas no meio do piso, conforme mostra a figura 2.20. São adotados onze casos de carregamentos, com as frequências de excitação variando de 2,04 Hz a 2,63Hz. Para os limites de vibração são adotados três tipos diferentes de aceleração: de pico, *RMS* e em VDV. Os autores comentam ainda que a análise modal apresenta para os dezesseis primeiros modos de vibração frequências naturais cujos valores estão dentro da faixa dos três primeiros harmônicos do carregamento, sendo assim todos eles passíveis de excitação.

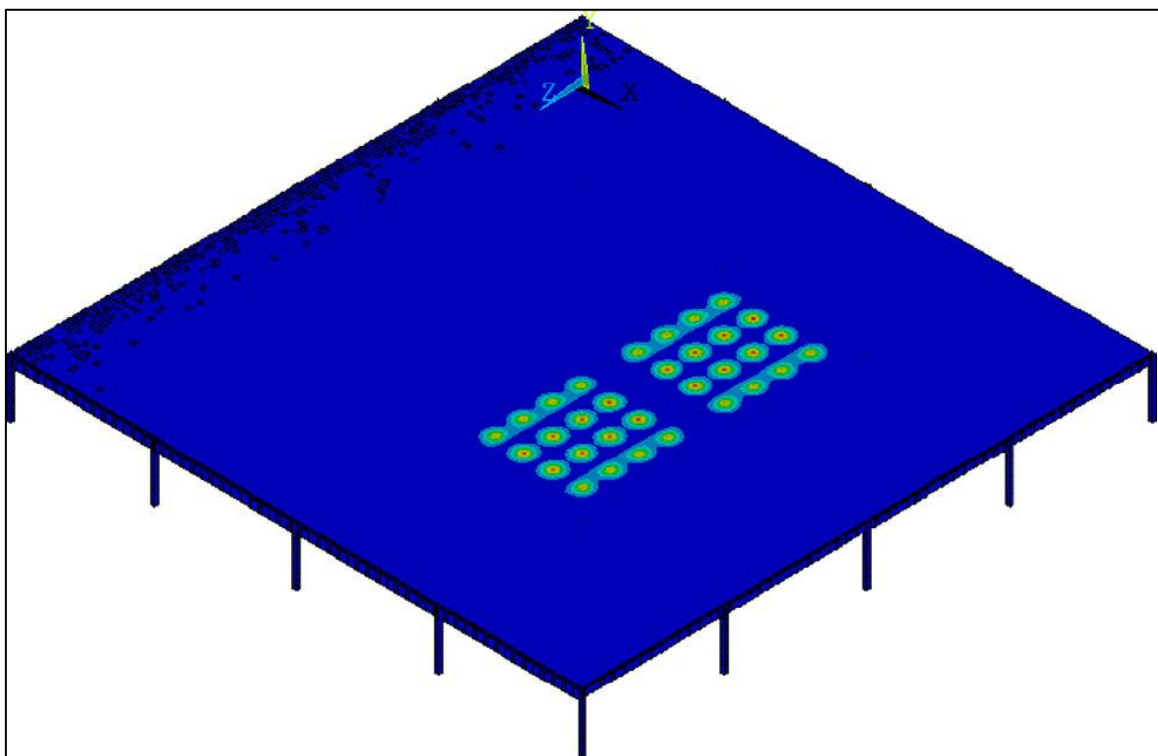


Figura 2.20 – Carregamento do piso de academia estudado – Gaspar *et al* (2016)

Do trabalho de Da Silva *et al* (2014) já haviam sido verificadas vibrações excessivas no piso em questão, situação pela qual Gaspar *et al* (2016) apresentam uma proposta de controle para a situação. No estudo são adotados dezesseis AMS localizados próximos ao centro dos painéis, conforme mostra a figura 2.21.

Os autores optam pelo dimensionamento dos elementos de atenuação através do método proposto por Den Hartog (1956) e comentam sobre a validação do modelo. Para tanto é realizada uma comparação dos resultados analíticos e numéricos do piso quando submetido a um carregamento sinusoidal em ressonância, em situação análoga à estudada pelo referido pesquisador.

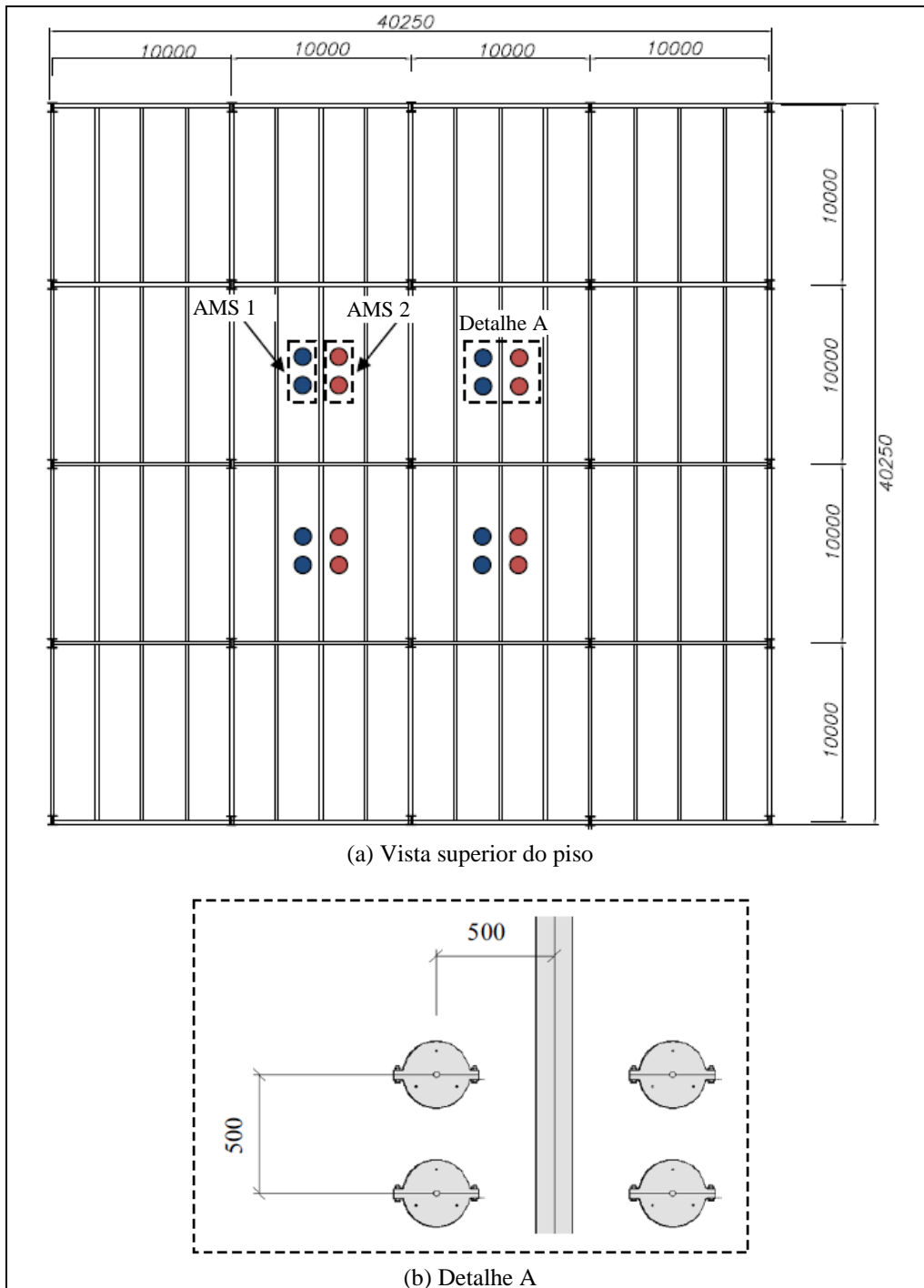


Figura 2.21 – Localização dos AMS no piso – Gaspar *et al* (2016)

Como resultado os pesquisadores conseguem diminuir as vibrações do piso a níveis satisfatórios em relação ao conforto humano, com reduções que variam de 57% a 91% para acelerações de pico, 59% a 93% para acelerações em *RMS* e 58% a 92% para as vibrações em *VDV*. Os estudiosos ainda comentam sobre a viabilidade dos dispositivos, sendo sugeridas como uma opção de baixo custo para situações semelhantes.

2.4.3. Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos em Arquibancadas

O Soldier Field Stadium em Chicago, aberto ao público em outubro de 1924 foi reformado e reaberto ao público em setembro de 2003. A parte inferior do estádio foi praticamente toda reconstruída, porém, sua fachada principal teve que ser mantida, face à situação de tombamento. Um dos requisitos para a reforma da estrutura foi o aumento na capacidade de público, porém, a condição histórica acarretou em uma dificuldade a mais aos projetistas, visto que não se podiam inserir novos pilares para a sua sustentação. A parte geométrica foi resolvida com a utilização de vigas em balanço, porém, durante o desenvolvimento do projeto, já se constatou o alto índice de vibração que a parte mais alta da estrutura experimentaria. A estrutura da nova arquibancada pode ser vista na figura 2.22.



Figura 2.22 – Vista da nova arquibancada do Soldier Field, Chicago – Estados Unidos
http://www.thorntomasetti.com/projects/soldier_field/ acesso em 23 de fevereiro de 2016

A solução para o problema é apresentada por Sacks *et al* (2005), com a instalação de 21 AMS no topo dos balanços. Os amortecedores consistem de uma viga de aço em caixa cheia de concreto com 7,5m a 10,6m de comprimento; 0,43m de largura e 1,2m a 1,8m de altura, de maneira que a massa total dos atenuadores fosse de 18.140 kg. As molas e amortecedores são inseridos nos extremos das vigas e ligados às pontas dos balanços,

fechando o sistema de amortecimento. Para aumentar a banda de frequências, optou-se pela utilização de um sistema com rigidez e amortecimento variáveis, controlados por 64 acelerômetros ligados a uma central de dados que é capaz de alterar os parâmetros dos AMS e otimizar todo o sistema. Dessa forma, foi possível sintonizar os atenuadores à faixa de 1.5 Hz a 2.7 Hz em incrementos de 0.1 Hz e taxa de amortecimento variando entre 0,06 a 0,13% do valor crítico. O resultado da aplicação dos amortecedores foi a redução de 33% a 90% das acelerações nas arquibancadas.

Reynolds *et al* (2012) estudam o controle de vibração de uma arquibancada de um estádio de futebol no Reino Unido. A figura 2.23 apresenta a estrutura em questão. O problema de vibração se pronuncia com maior intensidade no balanço da estrutura, região onde se estuda a colocação dos atenuadores.

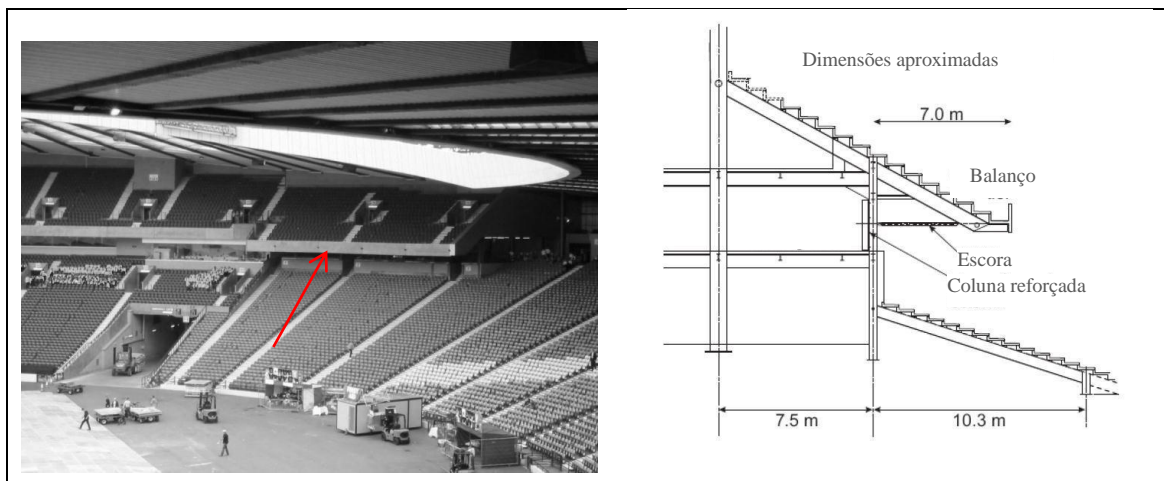


Figura 2.23 – Vista da arquibancada e seção transversal – Reynolds *et al* (2012)

O trabalho apresenta a comparação do controle feito com dispositivos atenuadores à taxa de 98,40% da primeira frequência da estrutura. São adotados amortecedores do tipo passivo e híbrido, contendo a mesma massa, rigidez e amortecimento, cujos valores são de 2174 kg, 850786 N/m e 4412 Ns/m, respectivamente.

Os autores conseguem bons resultados com o emprego dos dispositivos, sendo de 20 % a redução da aceleração para o sistema passivo e de 50% no caso do sistema híbrido. Por fim comentam sobre a possibilidade de adoção dos dois métodos, no entanto, chamam atenção para o uso do Amortecedor Híbrido, face ao aumento de desempenho em relação ao método simplesmente passivo.

O Estádio do Sporting Clube em Portugal foi construído em 2003 para os eventos esportivos do Euro 2004. A estrutura conta com 50 mil assentos, divididos em 8 blocos

independentes, formados por 48 pórticos com afastamentos entre 10,50 m na parte inferior e 12,50 m na parte externa. As arquibancadas são pré-moldadas e protendidas com seções transversais do tipo T na região central e tipo L, nas extremidades. A figura 2.24 apresenta os pórticos e os modelos de arquibancadas existentes:

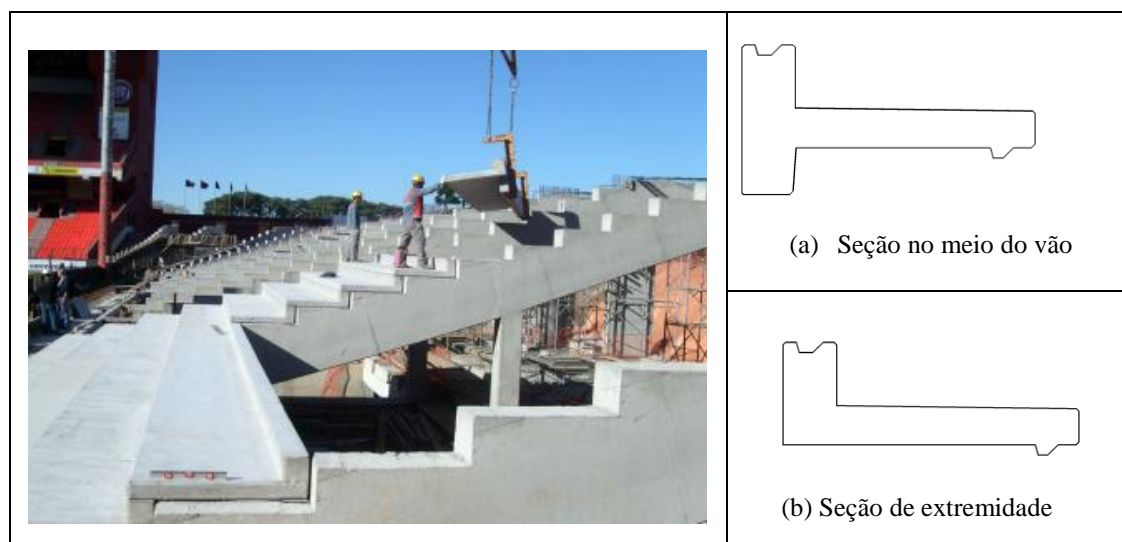


Figura 2.24 – Vista da arquibancada pré-moldada e seção transversal – Silva (2012)

Silva (2012) apresenta um estudo detalhado sobre as vibrações existentes na estrutura e propõe soluções para a sua atenuação com o uso de AMS. A arquibancada é modelada de como viga bi apoiada independente e submetida ao carregamento cíclico. De posse dos resultados o autor apresenta cinco propostas de atenuação de vibração, variando a quantidade e a massa dos dispositivos. A opção com melhores resultados consegue reduzir as acelerações a cerca de 50% do valor inicial, porém, o autor considera o resultado não satisfatório, visto que os índices de vibração ainda superam os limites aceitáveis e a massa adicionada afeta significativamente a flexão na estrutura. Por fim é feita uma verificação da simples interconexão dos elementos das arquibancadas pré-moldadas e chega-se a valores de vibração bastante inferiores aos obtidos com o uso do AMS.

3. EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo são apresentadas as equações do movimento tanto para uma estrutura simples, contendo apenas um grau de liberdade e um amortecedor de massa quanto para a forma generalizada, com diversos graus de liberdade e amortecedores anexados. São apresentados também os critérios de otimização dos atenuadores e alguns dos principais modelos de carregamento desenvolvidos por pesquisadores da área.

3.1. EQUAÇÕES DO MOVIMENTO PARA SISTEMAS SIMPLES LIGADOS A UM AMS

Para um sistema com um grau de liberdade sujeito a uma ação dinâmica $F(t)$ e um AMS instalado, figura 3.1, as equações do movimento são dadas por:

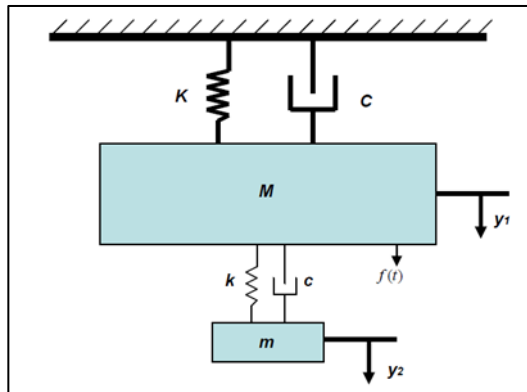


Figura 3.1 – Sistema simples com um AMS – Lara (2007)

$$M\ddot{y}_1(t) + C\dot{y}_1(t) + Ky_1(t) = F(t) + k[y_2(t) - y_1(t)] + c[\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)] \quad (3.1)$$

$$m\ddot{y}_2(t) + c[\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)] + k[y_2(t) - y_1(t)] = 0 \quad (3.2)$$

onde M , C e K são respectivamente a massa, o amortecimento e a rigidez do sistema principal, m , c e k representam o amortecimento e a rigidez do AMS, $y_1(t)$ é o deslocamento do sistema principal em relação à base, $y_2(t)$ é o deslocamento da massa do AMS em relação à base e $F(t)$ é a excitação dinâmica.

3.2. EQUAÇÕES DO MOVIMENTO PARA SISTEMAS COMPLEXOS LIGADOS A VÁRIOS AMS

Para o caso de sistemas complexos com N graus de liberdade sujeitos à ação dinâmica $F(t)$ e múltiplos (Z) AMS instalados, as equações do movimento são dadas por:

$$M\ddot{y}_1(t) + C\dot{y}_1(t) + Ky_1(t) = F(t) + k[y_2(t) - y_1(t)] + c[\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)] \quad (3.3)$$

$$\mathbf{m}\dot{\mathbf{y}}_2(t) + \mathbf{c}[\dot{\mathbf{y}}_2(t) - \dot{\mathbf{y}}_1(t)] + \mathbf{k}[\mathbf{y}_2(t) - \mathbf{y}_1(t)] = 0 \quad (3.4)$$

onde \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são respectivamente as matrizes de ordem $N \times N$ de massa, de amortecimento e de rigidez do sistema principal, \mathbf{m} , \mathbf{c} e \mathbf{k} são matrizes de ordem $Z \times Z$ de massa, do amortecimento e da rigidez do AMS, $\mathbf{y}_1(t)$ é vetor de ordem N que representa o deslocamento estrutural, $\mathbf{y}_2(t)$ é o vetor de ordem Z representante do deslocamento das massas do AMS em relação à base e $\mathbf{F}(t)$ é o vetor de ordem N correspondente à excitação dinâmica.

3.3. CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO PARA AMS

Os parâmetros a serem otimizados em um AMS são a massa, a rigidez e o amortecimento. O principal objetivo para sua aplicação é a redução do deslocamento estrutural quando submetido a um carregamento dinâmico. A seguir são apresentados dois casos de otimização, propostos por Den Hartog e Jangid.

3.3.1. Critério de Den Hartog para otimização do AMS

Segundo Lima (2007), Den Hartog (1956) foi o pioneiro no estudo de otimização de absorvedores dinâmicos. O pesquisador apresentou estudos de sistemas não amortecidos submetidos à excitação harmônica e obteve expressões para obtenção de parâmetros ótimos de atenuadores, tanto para estruturas simples, de um grau de liberdade, quanto para as de diversos graus.

O trabalho de Den Hartog (1956) contribuiu com as seguintes expressões para o dimensionamento de um AMS:

$$\alpha_{\text{ótimo}} = \frac{1}{1+\mu} \quad (3.5)$$

onde $\alpha_{\text{ótimo}}$ é a razão ótima entre a frequência do AMS (f) e a frequência natural do sistema principal que se queira sintonizar o amortecedor (f_n); e μ é a razão de massa entre os dois sistemas, assim:

$$\alpha_{\text{ótimo}} = \frac{f}{f_n} \quad (3.6)$$

e

$$\mu = \frac{m}{M} \quad (3.7)$$

A partir das equações 3.6 e 3.7 podem ser obtidas a massa m e a frequência f do AMS. De posse da frequência do AMS, procede-se ao cálculo da sua frequência angular ω , assim:

$$\omega = 2. \pi. f \quad (3.8)$$

Calculado w , calcula-se a rigidez do amortecedor k segundo a expressão abaixo:

$$k = \omega^2. m \quad (3.9)$$

A razão de amortecimento do AMS ε pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (3.10)$$

O amortecimento c fecha o cálculo do amortecedor e pode ser obtido da seguinte forma:

$$c = 2. \varepsilon. m. \omega \quad (3.11)$$

3.3.2. Critério de Jangid para otimização do AMS

Segundo Silva (2012), Bakre e Jangid (2006) desenvolveram parâmetros ótimos para o dimensionamento de um AMS em sistemas principais amortecidos, sujeitos a vários tipos de carregamentos dinâmicos, cujo objetivo era de minimizar o deslocamento estrutural. Através de processos iterativos, os autores determinaram o coeficiente de amortecimento ótimo ε e da razão ótima de frequências $\alpha_{ótimo}$ do AMS para os casos estudados e depois, a partir do ajuste de curvas, obtiveram funções específicas para cada tipo de carregamento.

Para o caso da aplicação de força externa $f(t)$ ao sistema principal, a razão de amortecimento ótima do AMS ε e a razão ótima de frequências $\alpha_{ótimo}$, podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$\alpha_{ótimo} = \sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{4(1+\mu)(1+\mu/2)}} \quad (3.12)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{1+\mu/2}}{1+\mu} + (a_1 + a_2\sqrt{\mu} + a_3\mu)\sqrt{\mu}\varepsilon_{est} + (a_4 + a_5\sqrt{\mu} + a_6\mu)\sqrt{\mu}\varepsilon_{est}^2 \quad (3.13)$$

onde ε_{est} é a razão de amortecimento da estrutura em relação ao amortecimento crítico (C_c) e os coeficientes a_1 a a_6 são apresentados na tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Coeficientes para o cálculo da razão ótima de frequências

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-0.50720	0.11169	0.52223	-0.01518	0.31876	0.23187

Jangid (1999) estudou um sistema não amortecido submetido a uma excitação na base com o intuito de apresentar parâmetros para otimização de AMSM. O trabalho consistiu de uma busca numérica que o autor realizou, alterando os parâmetros dos dispositivos até que conseguisse minimizar o deslocamento permanente do sistema principal.

Segundo Lara (2007), a técnica numérica desenvolvida por Jangid fundamentou-se no procedimento *min/max* proposto por Tsai e Lin (1993). Esta metodologia consistiu em variar a razão de amortecimento \mathcal{E} , a largura de banda β e a razão de frequência α do AMSM para uma dada razão de massa μ e n amortecedores, de forma que se obtivesse a maior redução da amplitude de pico da resposta no domínio da frequência R_{max} . Os intervalos admitidos para os parâmetros foram: $0 \leq \mathcal{E} < 1$; $0 \leq \beta < 2$ e $\alpha > 0$.

As expressões contendo os parâmetros ótimos para os AMSM sugeridos por Jangid são:

$$\mathcal{E} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)(1-\mu/2)}} + (a_1 + a_2\sqrt{\mu} + a_3\mu)\sqrt{\mu}[a_4\left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1\right) + a_5\left(\frac{1}{n} - 1\right) + a_6(\sqrt{n} - 1)] \quad (3.14)$$

$$\beta = (a_1 + a_2\sqrt{\mu} + a_3\mu)\sqrt{\mu}[a_4\left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1\right) + a_5(n - 1) + a_6\sqrt{n} - 1] \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.15)$$

$$\alpha_{ótimo} = \frac{\sqrt{1-0,5\mu}}{1+\mu} + (a_1 + a_2\sqrt{\mu} + a_3\mu)\sqrt{\mu}[a_4\left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1\right) + a_5(n - 1) + a_6(\sqrt{n} - 1)] \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.16)$$

$$R_{max} = \sqrt{\frac{2}{\mu}}(1 + \mu) + (a_1 + a_2\sqrt{\mu} + a_3\mu)\sqrt{\frac{1}{\mu}}[a_4\left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1\right) + a_5\left(\frac{1}{n} - 1\right) + a_6\left(\frac{1}{n\sqrt{n}} - 1\right)] \quad (3.17)$$

Os valores de a para o cálculo dos parâmetros acima são listados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Coeficientes para o cálculo de AMSM ótimo, Jangid (1999)

Coeficientes	Valor Correspondente			
	ε	β	$\alpha_{\text{ótimo}}$	R_{max}
a_1	0,5474	0,42113	-0,00241	0,2985
a_2	0,1038	0,04479	0,72152	-0,0078
a_3	-0,4522	-0,38909	-0,43970	0,2355
a_4	0,7604	-0,73518	-0,66385	-0,0442
a_5	0,3916	-0,11866	-0,01138	0,6265
a_6	0,0403	4,86139	0,99522	0,4789

A partir da razão ótima de frequências dada em 3.16 e da frequência natural da estrutura que se queira sintonizar os amortecedores calcula-se o valor das frequências médias dos dispositivos ω_m pela equação 3.18:

$$\omega_m = \alpha_{\text{ótimo}} \omega_{\text{est}} \quad (3.18)$$

A frequência de cada amortecedor ω_i é então calculada conforme a equação 3.19:

$$\omega_i = \omega_m \left[1 + \left(i - \frac{n+1}{2} \right) \frac{\beta}{n-1} \right] \quad (3.19)$$

Fixando a rigidez k dos AMSM, o cálculo das massas m_i pode ser feito conforme a equação 3.20:

$$m_i = \frac{k}{\omega_i^2} \quad (3.20)$$

A massa total resultante deverá satisfazer a condição pré-estabelecida para μ , assim:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{M} \quad (3.21)$$

O amortecimento c_i para cada amortecedor é calculado como se segue:

$$c_i = 2 \cdot m_i \cdot \varepsilon \cdot \omega_i \quad (3.22)$$

Segundo Jangid, as formulações são válidas para razões de massas inferiores a 10% e para até 31 AMSM e alerta para a possibilidade de erros caso algum dos parâmetros seja ultrapassado.

3.4. MODELAGEM DO CARREGAMENTO

Na análise estática a carga atuante em uma estrutura é considerada não variável ao longo do tempo, acarretando assim em uma única situação de deformada estrutural e em apenas uma solução para os deslocamentos, que permanecem estáticos durante a vida da construção. Por outro lado, na análise dinâmica a situação não é tão simples, uma vez que as cargas podem variar em função do tempo tanto na magnitude, quanto direção e sentido. Assim, a deformação e o deslocamento dos pontos da estrutura passam a ter variação temporal, fazendo com que apareçam acelerações e velocidades variáveis nesses pontos, causando assim a vibração do sistema.

Os carregamentos oriundos de atividades rítmicas humanas são exemplos bastante comuns de carregamentos dinâmicos. Campista (2015) e outros pesquisadores comentam que os carregamentos de atividades rítmicas podem ser classificados de duas formas: aqueles em que não há perda de contato do público com a estrutura, como a caminhada e a dança de salão e aqueles onde ocorre a perda de contato, como a corrida, a ginástica e o pulo. No caso de estádios de futebol, a modelagem se dá pela segunda forma, face à maior quantidade de energia aplicada na estrutura devido aos saltos dados pelos torcedores em momentos de euforia.

Diversos pesquisadores desenvolveram funções para modelar tais carregamentos. Na sequência são apresentados alguns desses modelos.

3.4.1. Modelo proposto por Bachmann *et al* (1987)

Bachmann *et al* (1987) sugerem a utilização de funções semi-senoidais para a modelagem do carregamento onde ocorre a perda de contato. A equação 3.23 e a figura 3.2 apresentam a função de carga proposta pelos autores:

$$F(t) = k_p G \operatorname{sen}\left(\frac{\pi t}{t_c}\right), \text{ para } 0 \leq t \leq t_c \quad (3.23)$$

$$F(t) = 0, \text{ para } t_c < t \leq T_p$$

onde:

k_p é o coeficiente de impacto, definido por $F(t)_{max}/G$;

$F(t)_{max}$ é o pico da força dinâmica;

G é o peso do indivíduo, normalmente considerado igual a 800 kN;

t_c é o tempo de contato entre a pessoa e a estrutura e

T_p é o período da atividade.

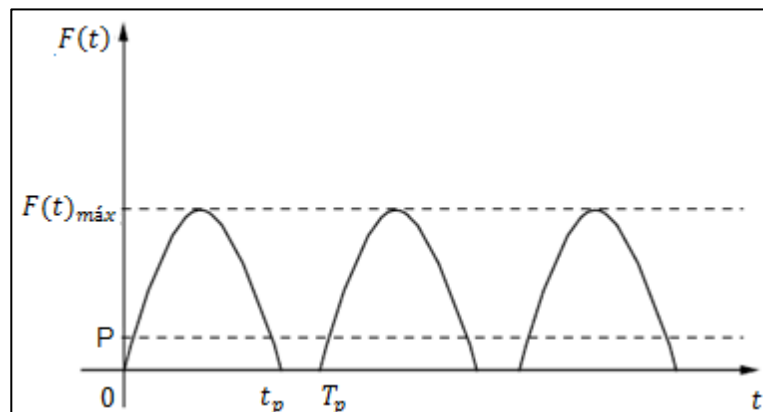


Figura 3.2 – Carregamento oriundo do salto de uma pessoa – Bachmann *et al* (1987)

Os pesquisadores apresentam ainda um ábaco para avaliação do coeficiente de impacto com a relação dada pelo tempo de contato e o período da atividade, conforme mostra a figura 3.3.

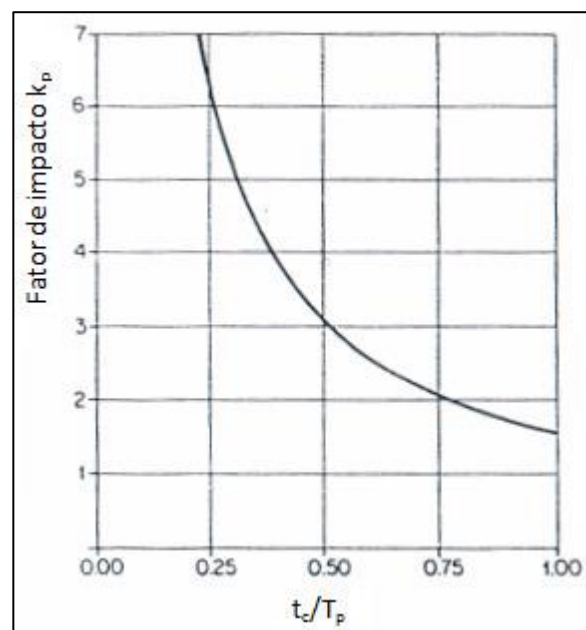


Figura 3.3 – Variação do coeficiente de impacto com a taxa t_c/T_p – Bachmann *et al* (1987)

Bachmann *et al* (1987) sugerem também a representação da função de carga pela série de Fourier, conforme equação 3.24

$$F(t) = G + \sum_{i=1}^{\infty} G\alpha_i \cdot \cos \left[2\pi \cdot i \cdot f_p \left(t - \frac{t_c}{2i} \right) \right] \quad (3.24)$$

onde:

G é o peso do indivíduo, considerado igual a 800 kN;

$G\alpha_i$ é a amplitude da força do i -ésimo harmônico;

f_p é a frequência da atividade;

i é o número do harmônico e

t_c é o tempo de contato entre a pessoa e a estrutura.

Autores como Rodrigues (1998, 2003), Lima (2007), Dos Santos (2009), Martins (2011), Silva (2012) e Lima (2013) adotaram, dentre outros, também modelo de carregamento proposto por Bachmann *et al* (1987) nos respectivos trabalhos desenvolvidos.

3.4.2. Modelo proposto pelo CEB 209 (1991)

Lançado em 1991, o boletim 209 do CEB apresenta um modelo em série de Fourier com a consideração dos três primeiros harmônicos para a caracterização dos carregamentos dinâmicos oriundos de atividades, conforme mostra a equação 3.25.

$$F(t) = G + \sum_{i=1}^n G\alpha_i \cdot \text{sen}(2\pi \cdot i \cdot f_p - \varphi_i) \quad (3.25)$$

onde:

G é o peso do indivíduo, considerado igual a 800 kN;

$G\alpha_i$ é a amplitude da força do i -ésimo harmônico;

f_p é a frequência da atividade;

φ_i é o ângulo de fase do i -ésimo harmônico e

i é o número do harmônico.

O modelo proposto apresenta uma equação bastante parecida com a oferecida por Bachmann *et al* (1987), diferindo basicamente na forma de apresentação dos parâmetros.

O boletim propõe ainda uma tabela com valores de faixas de frequências características para diversos tipos de atividades, além dos ângulos de fase de cada um dos três harmônicos utilizados e a quantidade de pessoas em função da área a serem adotadas para algumas situações de carregamento, no entanto, não oferece parâmetros específicos para arquibancadas e estádios. Na tabela 3.3 são apresentados os dados referentes à atividade aplaudir de pé com saltos, tendo como base os parâmetros sugeridos pelo boletim 209 do CEB.

Tabela 3.3 – Parâmetros de projeto recomendados pelo CEB 209 (1991)

Tipos Representativos de Atividade	Frequência (Hz)	Coef. de Fourier e ângulos de fase					
		α_1	φ_1	α_2	φ_2	α_3	φ_3
Aplaudir de pé com saltos	1,6	0,17	0	0,10	$\pi/2$	0,04	$\pi/2$
	2,4	0,38		0,12		0,02	

3.4.3. Modelo proposto por Faísca (2003)

Faísca (2003) realizou uma série extensa de testes experimentais cujo objetivo foi de descrever o carregamento dinâmico gerado por atividades humanas. Para a realização do estudo, a autora trabalhou atividades ritmadas e não ritmadas, tais como salto com e sem estímulo, ginástica aeróbica, torcidas de futebol e plateias de *show*. Os ensaios foram realizados em uma plataforma de 12,20m por 2,20m com apoios móveis, simulando assim o estudo do carregamento humano em estruturas rígidas e flexíveis.

A partir dos dados de carregamentos obtidos, a pesquisadora fez um ajuste de curvas para as solicitações do tipo “saltar” e chegou à conclusão de que a função semi-seno não é a mais apropriada para simular o carregamento, conforme proposto por alguns pesquisadores, mas sim a função *Hanning* (BRIGHAM, 1988), conforme mostra a figura 3.4.

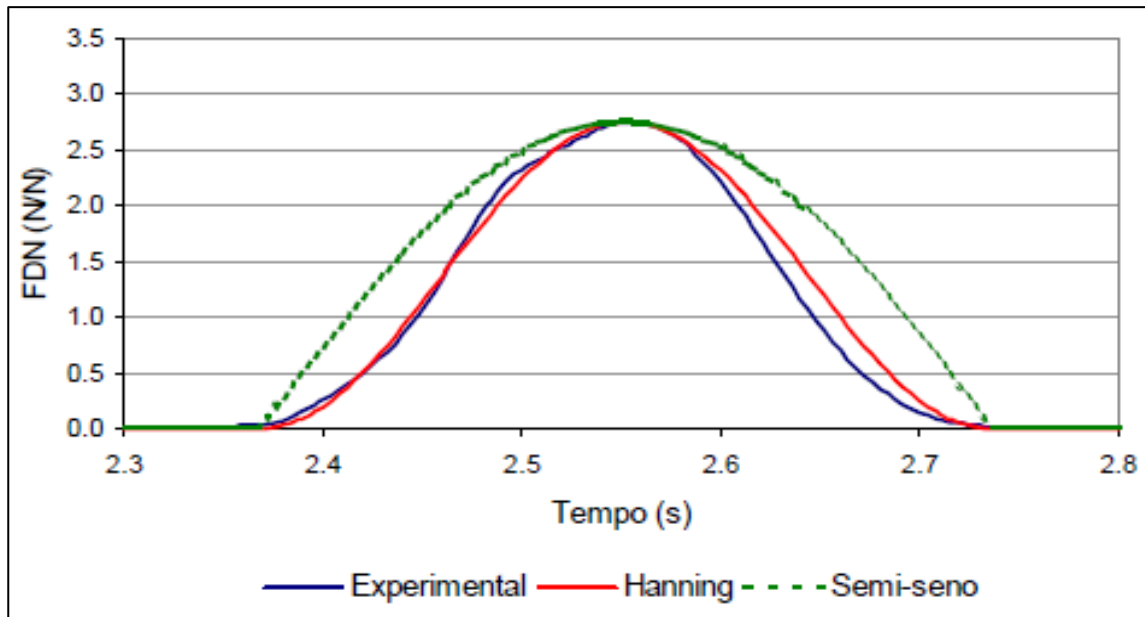


Figura 3.4 – Comparação entre as curvas experimental, semi-seno e *Hanning* – Faísca (2003)

Na figura anterior, a grandeza FDN é dada pela razão entre a força dinâmica e o peso do indivíduo.

A função proposta pela autora para a modelagem dos carregamentos é apresentada em 3.26.

$$F(t) = CD\{k_p G[0,5 - 0,5 \cos \frac{2\pi}{t_c} t]\}, para t_c < t \leq T_p \quad (3.26)$$

$$F(t) = 0, para t_c < t \leq T_p$$

onde:

$F(t)$ é a representação do carregamento dinâmico no tempo;

CD é coeficiente de defasagem;

k_p é o coeficiente de impacto;

G é o peso do indivíduo, considerado igual a 800 kN;

t é o tempo em (s);

t_c é o tempo de contato entre a pessoa e a estrutura e

T_p é o período da atividade.

É importante ressaltar que o coeficiente de impacto (k_p) atua de forma a majorar as cargas, e decorre da quantidade maior de força que a pessoa aplica na estrutura ao entrar em movimento. Por outro lado, o coeficiente de defasagem (CD) pondera o carregamento em função dos efeitos de multidão, levando em conta o grau de sincronismo entre os indivíduos.

Os estudos realizados mostram ainda que o coeficiente CD apresenta variação em função da quantidade de pessoas que exercem a atividade rítmica, sendo mais acentuada para pequenos grupos e tendendo à estabilização um valor final quando o número de pessoas se aproxima de uma centena.

A figura 3.5 apresenta a variação do coeficiente de defasagem levando em conta os tipos de atividades estudados pela pesquisadora e a quantidade de pessoas que as desenvolveram.

Os demais parâmetros necessários à modelagem dos carregamentos, tais como o período da atividade, o tempo de contato e o coeficiente de impacto propostos pela pesquisadora para as três atividades estudadas são mostrados na tabela 3.4.

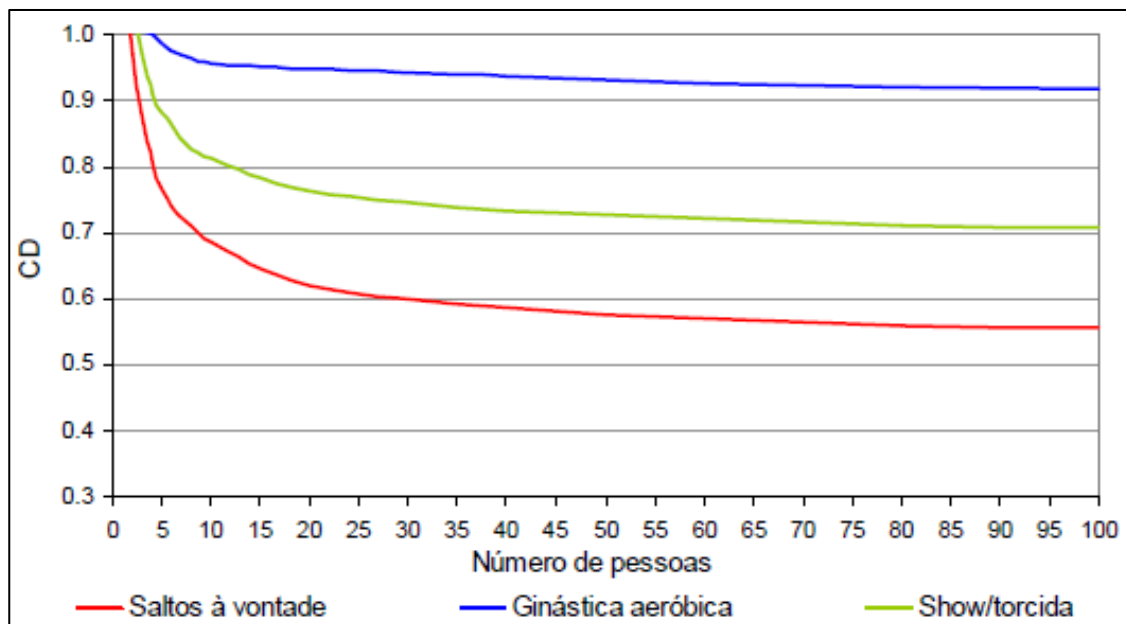


Figura 3.5 – Coeficientes de defasagem em função da atividade e número de pessoas – Faísca (2003)

Tabela 3.4 – Parâmetros de projeto recomendados por Faísca (2003)

Atividades	T_p (s)	t_c (s)	K_p
Saltos à vontade	$0,44 \pm 0,15$	$0,32 \pm 0,09$	$3,17 \pm 0,58$
Ginástica aeróbica	$0,44 \pm 0,09$	$0,34 \pm 0,09$	$2,78 \pm 0,60$
Show/torcida	$0,37 \pm 0,03$	$0,33 \pm 0,09$	$2,41 \pm 0,51$

A pesquisadora comenta ainda que os modelos de carregamentos propostos apresentam situações de cargas bastante inferiores às recomendadas pelo CEB 209 (1991), explicando que a redução nos picos de carregamento ocorre devido à consideração do coeficiente de defasagem dado pela perda de sincronismo da multidão, o qual não é considerado pelo boletim.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos de carregamentos apresentados são amplamente utilizados por diversos pesquisadores e até propostos por normas, como é o caso do CEB 209 (1991).

Para este trabalho é adotada a proposta feita por Faísca (2003), tendo em vista não só a maior precisão encontrada no ajuste de curvas apresentado em sua pesquisa, ao comparar os dados experimentalmente medidos às funções *Hanning* e semi-seno, mas também pela facilidade de se utilizar o modelo proposto pela pesquisadora no caso de análise de estruturas no domínio do tempo.

Deve ser ressaltado que existem outras funções de carga além das aqui apresentadas, como a proposta por Ellis e Ji (2004) *apud* Campista (2015), ou ainda modelos biodinâmicos, que levam em conta a massa e o amortecimento do público na resposta da estrutura. Estes diferentes modelos podem apresentar variações consideráveis nas respostas do sistema e têm sido objeto de estudo por diversos pesquisadores, o que mostra não só a importância do assunto, mas também o quanto ainda há de se pesquisar até que seja encontrado o modelo ideal.

4. CONFORTO HUMANO

Diversas normas e guias de projeto foram desenvolvidas no decorrer dos anos com o intuito de apresentar limites aceitáveis de vibração em estruturas sujeitas a carregamentos dinâmicos. Neste capítulo são apresentadas algumas das principais publicações acerca destes limites no tocante aos critérios de conforto humano.

4.1. ISO 2631/1 (1985)

A norma internacional ISO 2631/1 (1985) considera que as vibrações podem afetar as pessoas de muitas formas, causando desde o desconforto, a perda da capacidade de concentração e de eficiência no trabalho até a ocorrência de danos à saúde. Os três distintos níveis para avaliação do conforto humano são assim apresentados:

- Limite de conforto reduzido, abaixo do qual o distúrbio é tolerável;
- Limite de fadiga, abaixo do qual o indivíduo consegue efetuar as tarefas diárias com um mínimo de conforto, chegando à fadiga no final da jornada;
- Limite de exposição, acima do qual a norma avalia que os efeitos dos carregamentos possam causar efeitos à saúde.

De acordo com a norma, os níveis de conforto acima descritos devem ser analisados em função da frequência de ocorrência da vibração, bem como da direção e de seu comportamento ao longo do tempo, se contínua, intermitente ou transitória. No mais, a percepção e tolerância à vibração variam ainda com o tipo de atividade e o local onde a desenvolve, assim como com o horário e com a expectativa do conforto.

Segundo a norma, a avaliação da vibração deve ser feita pelo emprego da aceleração efetiva em *RMS*, conforme mostra a equação 4.1:

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad (4.1)$$

onde:

a_{ef} é a aceleração efetiva;

T é o período de tempo onde se verifica a aceleração efetiva;

a_w é a aceleração ponderada em função do tempo;

t é o tempo.

A ISO 2631/1 (1985) apresenta ábacos com curvas iso-sensitivas de aceleração em *RMS* em função da frequência de excitação e diferentes tempos de exposição para verificação da fadiga do usuário. A figura 4.1 apresenta o sistema cartesiano considerado e as figuras 4.2 e 4.3 as referidas curvas. A norma explica ainda que para o limite de exposição, deve-se multiplicar os valores mostrados no gráfico por 2, para o limite de conforto reduzido, deve-se dividi-los por 3,15.

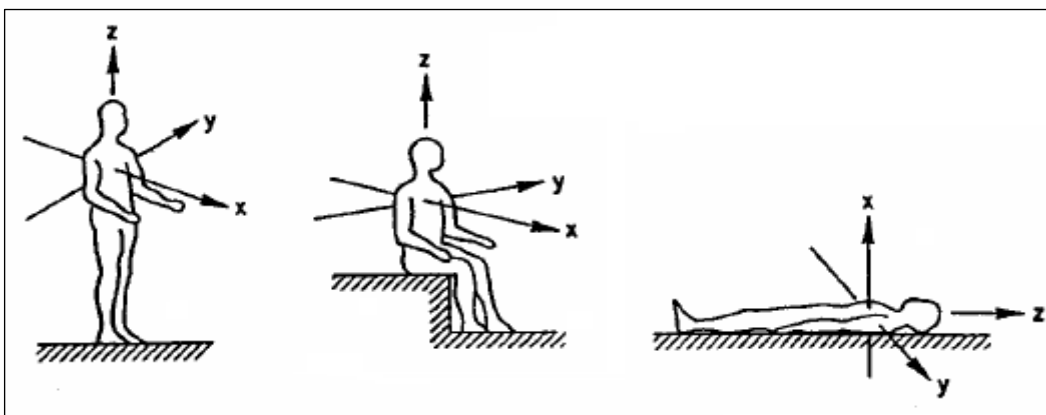


Figura 4.1 – Sistemas de coordenadas segundo a orientação da pessoa – ISO 2631/1 (1985)

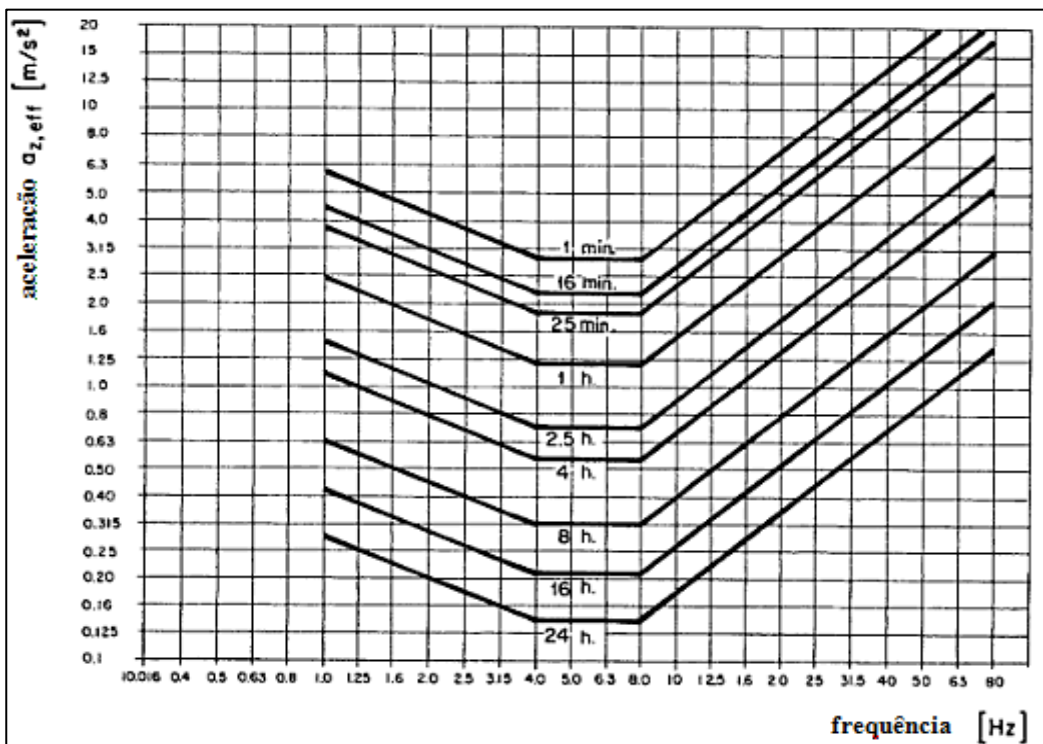


Figura 4.2 – Limites para aceleração segundo o eixo z para o limite de fadiga – ISO 2631/1 (1985)

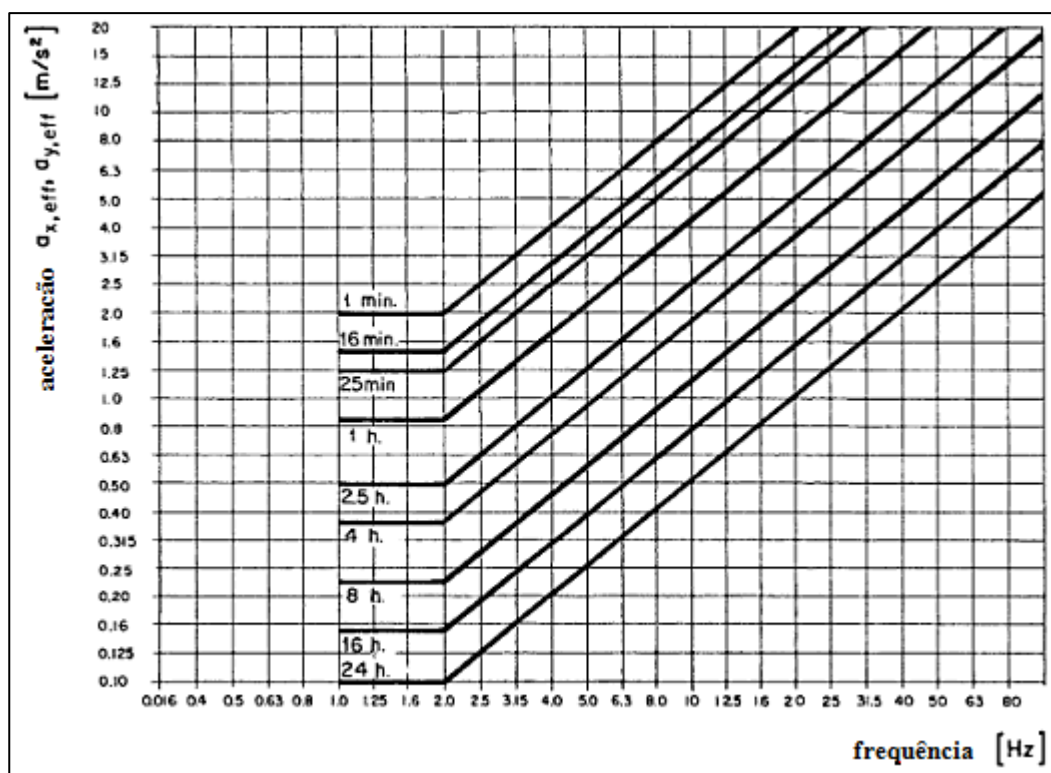


Figura 4.3 – Limites para aceleração segundo os eixos x ou y para o limite de fadiga – ISO 2631/1 (1985)

A ISO 2631 (1985) considera os efeitos dos carregamentos periódicos ou vibrações transientes na faixa de frequências de 1Hz a 80Hz.

4.2. BACHMANN *ET AL* (1995)

Bachmann *et al* (1995) apresentam uma proposta com limites de acelerações aceitáveis para diferentes tipos de ambientes, incluindo passarelas, pisos de escritórios, pisos de academias e salas de esportes e salas para concertos. A tabela 4.1 resume as propostas feitas pelos autores:

Tabela 4.1 – Níveis de vibração aceitáveis para diferentes ambientes

Estrutura	Níveis aceitáveis
Passarelas para pedestres	$a \leq 5\% g$
Edifícios para escritórios	$a \leq 0,5\% g$
Academias (salas de esportes)	$a \leq 5 - 10\% g$
Salas para concertos e teatros	$a \leq 1\% g$
Salas para concertos de música pop	$a \leq 5\% g$

4.3. CEB 209 (1991)

O CEB lançou em 1991 o boletim 209 que traz recomendações de projeto acerca da sensibilidade e conforto humano com relação às vibrações ocorrentes em estruturas. O Boletim cita que o corpo humano é capaz de perceber oscilações da ordem de 0,001mm e explica que a percepção pode ser afetada por diversos parâmetros, tais como a direção da incidência da vibração em relação à espinha dorsal, a posição em que o ser humano se encontra, a atividade que está sendo realizada, a frequência e o horário de ocorrência e a duração da vibração, bem como a faixa de frequência e a amplitude de deslocamento, a velocidade e a aceleração.

A tabela 4.2 apresenta as faixas de percepção humana devido à vibração vertical e foi confeccionada a partir de valores coletados e comparados de outros autores que pesquisaram sobre o assunto:

Tabela 4.2 – Faixas de percepção humanas devido à vibração vertical – CEB 209 (1991)

Descrição da vibração	Faixa de Frequência de 1-10 Hz	Faixa de Frequência de 10-100 Hz
	Aceleração máxima (mm/s ²)	Velocidade máxima (mm/s)
Apenas Perceptível	34	0,5
Claramente Perceptível	100	1,3
Desconfortável	550	6,8
Intolerável	1800	13,8

Conforme Lima (2013) e Campista (2015), existe uma tolerância para os valores acima sugeridos de até duas vezes os valores indicados.

4.4. ISO 2631/1 (1997)

Esta norma internacional apresenta um novo método de análise em substituição ao método por faixas de frequências, utilizado na versão anterior. O novo procedimento relaciona apenas os valores calculados de aceleração equivalente com o tempo de exposição. Nos casos em que ocorrem grandes variações de aceleração durante o tempo, a norma propõe uma aceleração equivalente correspondente à duração total, calculada de acordo com a equação 4.2:

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{a_{w1}^2 T_1 + a_{w2}^2 T_2 + a_{w3}^2 T_3 + \dots + a_{wn}^2 T_n}{T_1 + T_2 + \dots + T_n}} \quad (4.2)$$

em que:

a_{eq} é a aceleração equivalente (*RMS*, em m/s²);

a_{wn} é a aceleração ponderada (*RMS*, em m/s²);

T_n é o tempo de duração da exposição a cada a_{wn} e

n é o número de instantes em que foi medida a aceleração.

A partir dos valores obtidos, caso hajam acelerações na mesma ordem de grandeza em dois ou mais eixos, deve ser feita também a verificação combinada, a partir da equação 4.3:

$$a_{comb} = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (4.3)$$

em que:

a_{comb} é a aceleração combinada ponderada (*RMS*, em m/s²);

a_{wx} é a aceleração ponderada no eixo x (*RMS*, em m/s²);

a_{wy} é a aceleração ponderada no eixo y (*RMS*, em m/s²);

a_{wz} é a aceleração ponderada no eixo z (*RMS*, em m/s²);

k_x, k_y e k_z são fatores multiplicadores iguais a 1,4 para os eixos x e y e 1,0 para o eixo z.

Os valores encontrados devem ser comparados ao gráfico de análise de efeito de vibração levando em conta o tempo de exposição ao qual o indivíduo estará exposto, conforme mostra a figura 4.4.

Segundo a norma, o gráfico mostrado na figura 4.4 deve ser interpretado da seguinte forma: a linha inferior apresenta um limite relacionado ao conforto humano, abaixo da qual os efeitos à saúde não têm sido claramente documentados e/ou observados. A zona acima da linha superior apresenta riscos prováveis à saúde e a existente entre os dois limites significa uma zona de precaução, podendo acarretar em potenciais riscos à saúde.

A ISO 2631/1 (1997) adota duas distintas linhas de pesquisas para os limites apresentados no gráfico. A norma destaca que a região hachurada mostra a convergência das curvas justamente no período onde ocorre a maioria dos efeitos de vibração sobre a saúde, ou seja, de 4h a 8h de exposição.

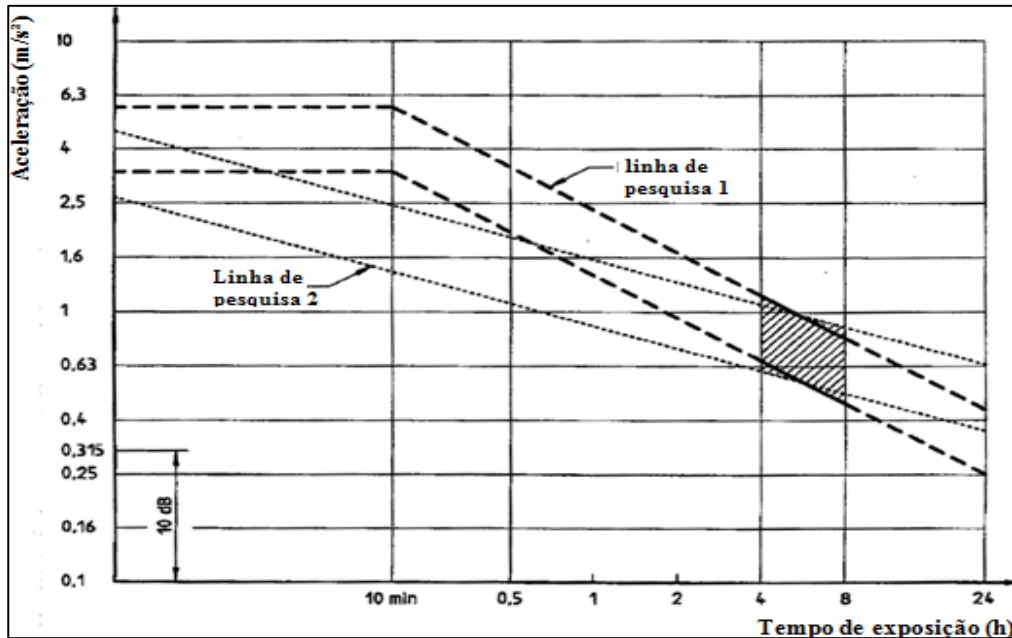


Figura 4.4 – Guia de efeito à saúde – ISO 2631/1 (1997)

A norma apresenta curvas de ponderação com os pesos a serem adotados no cálculo das acelerações efetivas, variando em função das frequências em que ocorrem os movimentos. A figura 4.5 apresenta a principal curva de ponderação adotada pela norma, onde W_d é utilizada para vibrações nos eixos X e Y e W_k para o eixo Z.

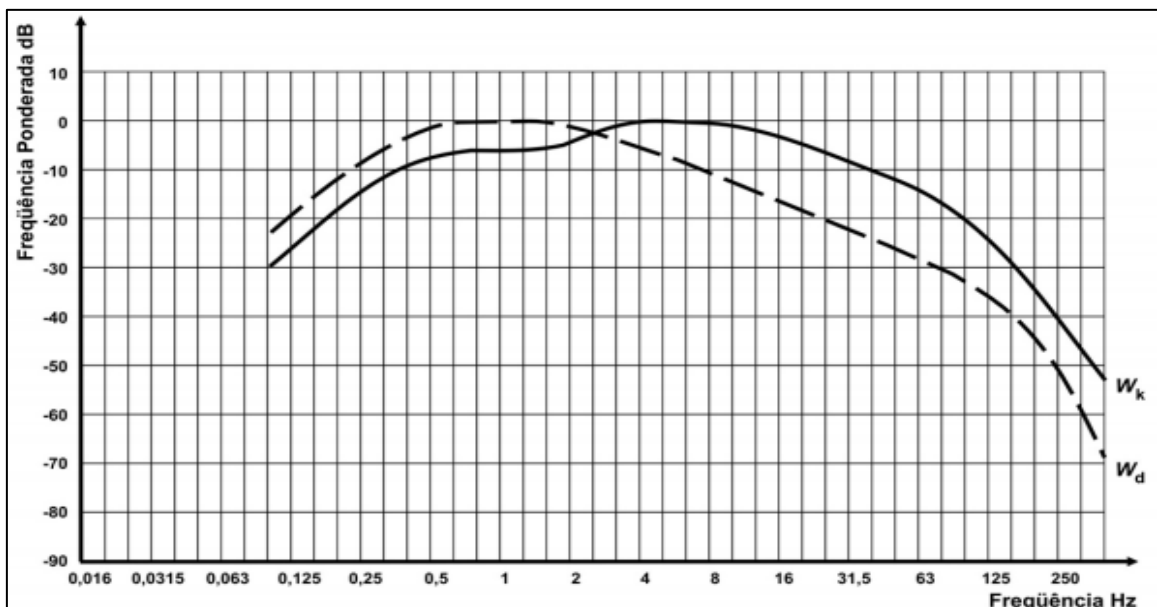


Figura 4.5 – Curvas de ponderação em função da frequência – ISO 2631/1 (1997)

Para os casos onde ocorram valores de pico consideráveis, a norma ISO 2631 (1997) sugere que o método de avaliação das acelerações em *RMS* pode subestimar os efeitos da vibração, recomendando que as acelerações sejam avaliadas em VDV, cujo cálculo é definido pela equação 4.4:

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w^4(t) dt} \quad (4.4)$$

onde:

VDV é o valor de dose de vibração;

T é o período de tempo onde se verifica vibração;

a_w é a aceleração ponderada em função do tempo

t é o tempo.

Conforme a ISO 10137 (2007), a avaliação por VDV deve ser realizada quando os valores de pico forem pelo menos seis vezes superiores aos obtidos no cálculo em *RMS*.

A ISO 2631 (1997) considera os efeitos dos carregamentos periódicos ou vibrações transientes em uma faixa de frequências praticamente igual à apresentada na versão anterior, variando de 0,5Hz a 80Hz.

4.5. ELLIS E LITTLER (2004)

Ellis e Littler (2004) apresentam trabalho sobre a aceitabilidade de pessoas aos níveis de vibrações existentes em Arquibancadas no Reino Unido e propõe uma alteração no método proposto pelo *British Standards Institution*. Os autores realizam medidas de acelerações em balanços de arquibancadas durante concertos e partidas de futebol e desenvolvem correlações para cálculo de acelerações de pico em VDV, através das quais sugerem a alteração do modo existente de avaliação, que leva em consideração as acelerações de pico.

Os autores propõem também limites aceitáveis de aceleração em VDV, conforme apresentado na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Limites de aceleração em VDV, Ellis e Littler (2012) *apud* Campista (2015)

Aceleração em VDV ($m/s^{1,75}$)	Reação
< 0,60	Limite aceitável
0,60 - 1,20	Baixa probabilidade de um comentário adverso
1,20 - 2,40	Possibilidade de um comentário negativo
2,40 - 4,80	Probabilidade de uma reação adversa
> 4,80	Inaceitável

Os autores comentam ainda sobre a eficiência do método, explicando que em todas as medições feitas nas arquibancadas para o caso de jogos de futebol, os valores em VDV encontrados ficaram abaixo do limite “baixa probabilidade de um comentário adverso” e, de fato, não houve nenhuma reclamação por parte do público. Já para o caso da análise de conforto em concertos, os limites de vibração em VDV ficaram abaixo do limite “possibilidade de um comentário negativo”, situação que também ocorreu.

4.6. SETAREH (2012)

Setareh (2012), *apud* Campista (2015) estuda um piso em balanço submetido a atividades rítmicas humanas, realizando o monitoramento das vibrações do piso e comparando os resultados às avaliações feitas pelos usuários, tendo como base as normas e guias de projeto existentes. O autor conclui que as avaliações utilizando acelerações de pico são insuficientes e sem precisão, sendo as os critérios de avaliação em *RMS* e VDV propostos pelas ISO 10137 mais apropriadas para o tema.

Campista (2015) apresenta ainda os limites de aceleração em VDV propostos por Setareh (2012), conforme mostra a tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Limites de aceleração em VDV, Setareh (2012) *apud* Campista (2015)

Aceleração em VDV ($m/s^{1,75}$)	Reação
< 0,50	Limite aceitável
0,50 – 3,50	Perturbador
3,50 – 6,90	Inaceitável
> 6,90	Provável condição de pânico

4.7. NBR 6118 (2014)

A norma brasileira NBR 6118 (2014) estabelece os requisitos necessários para a execução de projetos de estruturas de concreto armado e protendido no país.

Segundo a NBR 6118, a análise de vibrações pode ser feita em regime linear para as estruturas usuais e estabelece que para assegurar o comportamento estrutural satisfatório no tocante às vibrações, as construções devem ter sua frequência fundamental (f_1) o mais afastado possível da frequência crítica (f_{crit}). A norma coloca que as referidas frequências devem ser diferenciadas de pelo menos 20%, conforme a equação 4.1 e apresenta uma tabela com valores característicos de f_{crit} a serem adotados.

$$f_1 > 1,2f_{crit} \quad (4.1)$$

As frequências críticas para vibrações verticais em estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas apresentadas pela NBR 6118 são dadas na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Frequência crítica para estruturas – NBR 6118 (2014)

Caso	f_{crit} (Hz)
Ginásios de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou concerto, sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concertos com cadeiras fixas	3,5

A norma coloca ainda que nos casos especiais, em que suas prescrições não poderem ser atendidas, uma análise dinâmica mais acurada deve ser feita conforme estabelecido em normas internacionais, até que exista norma brasileira que trate do assunto.

4.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diferentemente do recomendado por outras normas e estudiosos da área de dinâmica das estruturas, a NBR 6118 (2014) não apresenta como critério de avaliação de conforto os limites associado às acelerações estruturais. Todavia, a referida norma é adotada nesse trabalho, uma vez que estabelece as diretrizes no cálculo de estruturas de concreto armado no país. Por outro lado, a NBR 6118 (2014) sugere que sejam utilizados normativos internacionais no caso de situações especiais, fato que justifica a utilização dos demais normativos e bibliografias apresentadas.

5. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

A realização do estudo de controle de vibrações no Estádio Nacional é feita através do programa SAP2000 (*Structural Analysis Program*), *software* amplamente adotado para soluções de estruturas tais como de prédios, pontes, passarelas, barragens, arrimos, torres, estádios e outras mais.

O programa se utiliza do Método dos Elementos Finitos para a realização das análises estáticas e dinâmicas, lineares ou não lineares. O *software* oferece elementos de barra, planos, planos com efeito de membrana e sólidos, permite a consideração de não linearidades físicas, como os efeitos reológicos de fluência e retração, bem como as não linearidades geométricas.

5.1. ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

A modelagem estrutural deve ser feita com os elementos que melhor simulem o comportamento real de cada uma das peças da estrutura estudada. O modelo geométrico adotado neste trabalho é o mesmo utilizado por Lima (2013) e utiliza elementos do tipo *frame* e *shell*.

O *software* oferece diversos elementos com características físicas e geométricas já catalogadas, além da opção de inserção ou alteração desses dados pelo usuário quando necessário.

Os carregamentos podem ser inseridos de diversas formas. Para o caso de cargas e momentos concentrados, a aplicação ocorre no nó, enquanto que para os distribuídos a inserção ocorre diretamente no elemento.

O manual explica que cada elemento finito tem seu próprio sistema de coordenadas locais, para a definição das propriedades dos materiais, cargas e para a interpretação das respostas. Além disso, cada um deles pode ser carregado por gravidade ou ainda em qualquer outro sentido e direção.

5.1.1. Elementos tipo *frame*

Os elementos do tipo *frame* são utilizados para a modelagem de vigas, colunas e treliças, em modelos planos ou tridimensionais.

O elemento é modelado através de uma linha que conecta dois nós, cada um contendo seis graus de liberdade, sendo três deslocamentos nas direções espaciais, torção e flexão em dois sentidos, conforme indica a figura 5.1.

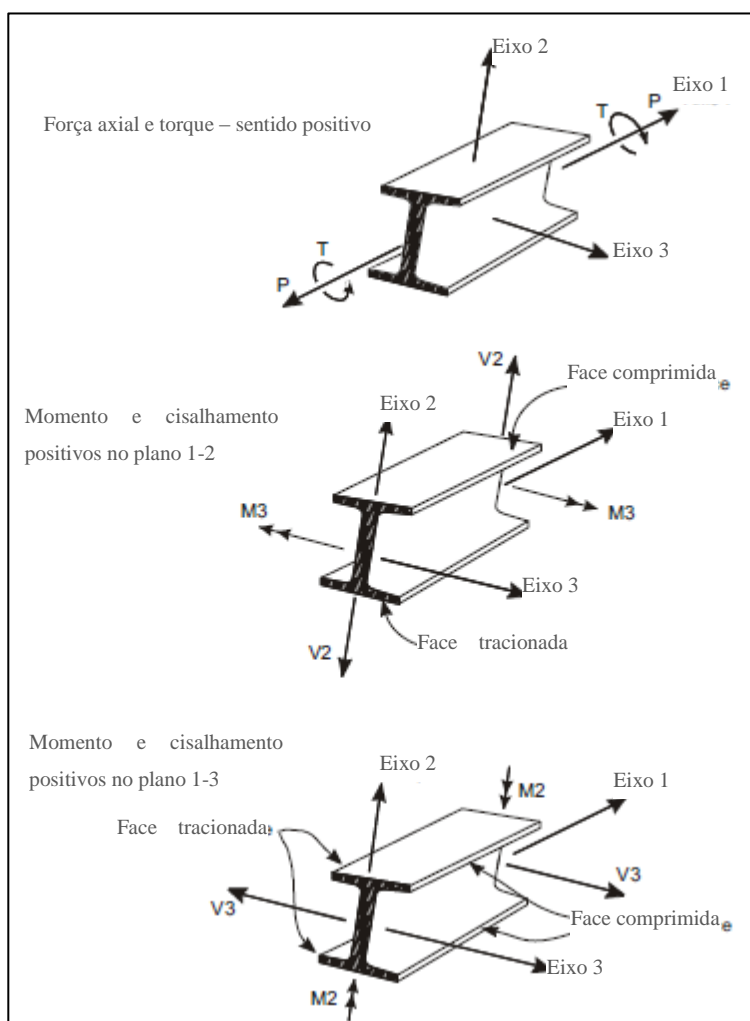


Figura 5.1 – Tipos de esforços nos elementos tipo *frame* – SAP2000

5.1.2. Elementos tipo *shell*

Os elementos do tipo *shell* são utilizados para a modelagem de peças planas em geral. Sua formulação combina os efeitos de placa e membrana, sendo ideal para utilização em paredes, lajes e tanques. O programa oferece a opção de elementos de três e quatro nós, contendo cada um os mesmos seis graus de liberdade dos elementos tipo *frame*, sendo assim possível fazer a compatibilização de deslocamentos na ligação entre ambos.

Segundo o manual, a simulação do comportamento de membrana é feita através de uma formulação isoparamétrica que inclui componentes de rigidez translacional no plano e componente de rigidez rotacional na direção normal ao plano. Já quanto ao

comportamento de placa, a formulação inclui componentes de rigidez rotacional fora do plano e componente de rigidez translacional na direção normal ao plano do elemento. O *software* utiliza a formulação de placas finas (Teoria de Kirchhoff) que negligencia a deformação por cisalhamento transversal como padrão, porém, oferece a opção pela utilização da formulação de placas espessas (Teoria de Mindlin/Reissner), que inclui efeitos de cisalhamento transversal.

O programa oferece ao usuário a opção de modelagem dos elementos tipo *shell* tanto por placa como por membrana pura, porém, o manual recomenda a utilização do elemento que contenha as duas formulações.

Os elementos *shell* podem ser triangulares ou tetraédricos (três ou quatro nós), com a conectividade entre os nós mostradas de acordo com as figuras 5.2 e 5.3. Conforme o manual, a formulação para o elemento quadrilátero é mais precisa e o elemento triangular é recomendável apenas para transições.

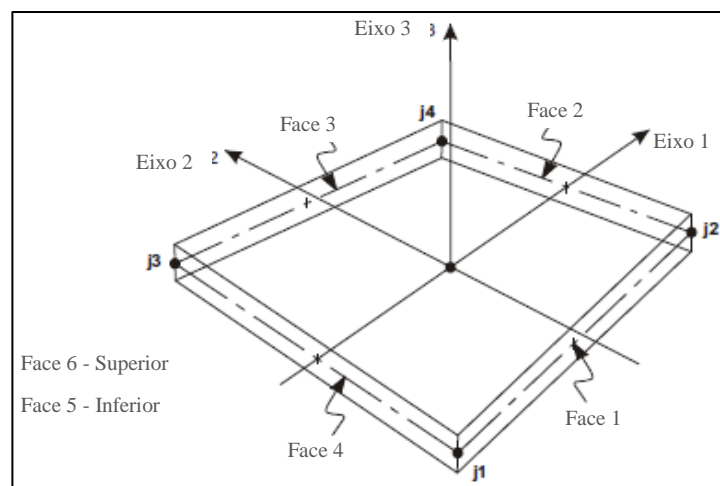


Figura 5.2 – Elemento shell de quatro nós – SAP2000

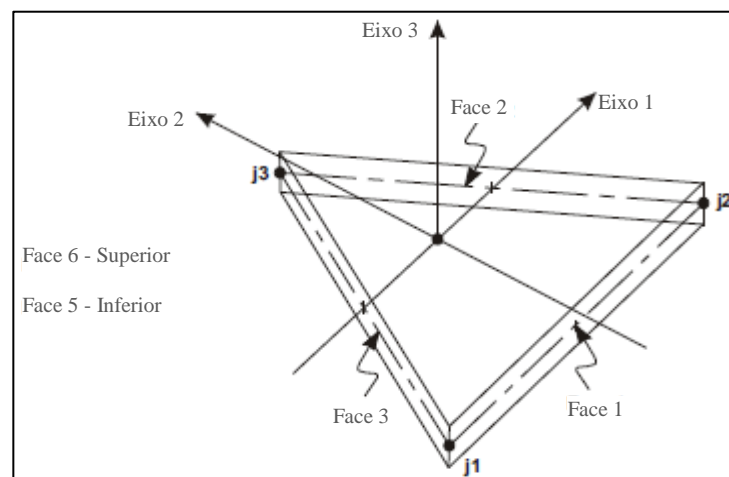


Figura 5.3 – Elemento shell de 3 nós – SAP2000

São apresentadas ainda algumas orientações no manual, a saber:

- O ângulo interno de cada canto deve ser inferior a 180° . No mais, explica que melhores resultados para os elementos de quatro nós são obtidos para ângulos próximos a 90° , ou, no máximo, entre 45° e 135° .
- A razão de aspecto de um elemento não deve ser grande demais. Para o elemento triangular, esta razão é a dada entre o maior e o menor lado. Para o elemento quadrilátero, considerando a distância entre os pontos médios de dois lados opostos, a razão é a existente entre a maior destas distâncias e a menor delas. Os melhores resultados são obtidos com valores de razão de aspecto próximos à unidade, ou pelo menos inferiores a 4, e nunca deve ser maior do que 10.
- Os quatro nós dos elementos quadriláteros não precisam estar necessariamente no mesmo plano, uma vez que uma pequena torção do elemento pode ser admitida. Na modelagem utilizada pelo programa, cada nó do elemento tem um vetor normal, que é perpendicular aos dois lados que nele se encontra. Dessa forma, no caso de haver alguma torção, o ângulo de giro é o mesmo existente entre dois dos vetores normais de dois nós quaisquer. O manual ressalta também que os melhores resultados são obtidos quando o maior ângulo de torção é menor do que 30° e enfatiza que este ângulo não deve exceder 45° .

5.2. ANÁLISE MODAL

O programa oferece duas metodologias para a realização da análise modal: método dos autovalores e autovetores e método de Ritz.

Na análise por autovalores e autovetores, os modos de vibração são determinados a partir da solução da equação de vibração livre não amortecida. Estes modos naturais fornecem uma excelente percepção do comportamento da estrutura e podem ser usados como base para análises do tipo *response spectrum* ou *time history*.

Já na análise pelos vetores de Ritz o programa tenta encontrar os modos de vibração que são excitados por um carregamento particular, conforme mostra Clough et al (2003), reduzindo assim o tempo de processamento na análise modal.

É importante ressaltar que é possível especificar a quantidade mínima e máxima de modos de vibração a serem encontrados, que serão obtidos desde que haja graus de liberdade suficientes para tal. Todavia, o programa utilizará apenas a contribuição destes modos nas análises tipo *response spectrum* ou *time history*.

5.3. ANÁLISE DO TIPO TIME-HISTORY

A *time-history* é uma análise passo-a-passo da resposta dinâmica da estrutura devido a um carregamento variável no tempo que pode ser linear ou não linear. A análise pode ser feita utilizando tanto a integração numérica quanto a superposição modal. O carregamento pode ser aplicado a partir de uma função arbitrária, escrita como uma soma finita de vetores espaciais, ou ainda uma função periódica como as produzidas por ondas.

Como *default* o programa possui as funções “seno”, “cosseno”, “função rampa”, “pulso triangular”, entre outras, que podem ter seus parâmetros alterados de forma a descrever o tipo de carregamento que se deseja aplicar. O *software* oferece ainda a opção de se inserir um carregamento discretizado, contendo pares de valores da função x tempo. Para tanto, deve ser feito o uso da opção “*from file*”, onde o usuário pode tanto inserir os dados manualmente quanto através da leitura destes a partir de um formato “txt”.

Definida a função de carregamento, é possível ainda a aplicação de um fator de escala, (alteração da amplitude da curva), bem como a alteração do fator de tempo (velocidade do carregamento) e o tempo de início da atuação (deslocamento da curva na abscissa). Além disso, o *software* oferece a opção de se inserir as condições iniciais da estrutura no início de cada caso de análise *time-history*, como deslocamentos e velocidades iniciais, o número de passos de tempo discretos da análise e o amortecimento modal, em termos de coeficiente de amortecimento.

5.4. MODELAGEM DOS AMORTECEDORES DE MASSA

Definidas as propriedades dos AMS, a modelagem no programa é feita através do uso de *links*, que se ligarão através do seu nó “j” ao nó “q” da estrutura, sendo coincidentes a partir de então. Já a massa do elemento atenuador deverá ser inserida no nó livre “i” do *link*, conforme mostra a figura 5.4.

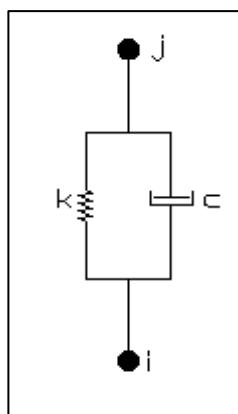


Figura 5.4 – *Link* para Amortecedor de Massa Sintonizado

Conforme o manual, a massa do amortecedor deverá atuar apenas no sentido em que houver movimento (translação e/ou rotação), levando em conta o sistema global de coordenadas. Já o amortecimento e a rigidez da mola deverão ser inseridos nas propriedades do *link* que fará a ligação da massa à estrutura, levando em conta os deslocamentos que poderão ocorrer, porém, utilizando o sistema local de coordenadas. No caso de um atenuador atuando apenas na vertical, por exemplo, a massa deverá ser inserida apenas no eixo global “Z”, ao passo que as demais propriedades deverão ser inseridas no eixo local “X” do *link*.

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Autores como Rodrigues (1998 e 2003), Martins (2011), Silva (2012), Lima (2013) e outros o adotam como *software* em seus estudos o SAP2000, mostrando a boa aceitação do programa por pesquisadores que se utilizam da solução via MEF de estruturas complexas, como a analisada neste trabalho.

6. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

Neste capítulo é apresentada uma pequena descrição do Estádio Nacional de Brasília, suas principais características e a sua importância para a realização da Copa do Mundo FIFA 2014.

6.1. O ESTÁDIO NACIONAL DE BRASÍLIA

O Estádio Nacional de Brasília é parte do Complexo Poliesportivo Ayrton Senna, que engloba ainda o Autódromo Internacional Nelson Piquet e o Ginásio de Esportes Nilson e Nelson, dentre outros.

A inauguração do estádio ocorreu em 1974, porém, em função da Copa do Mundo de 2014, foi reconstruído para que pudesse atender às exigências da FIFA e ser palco dos jogos. A demolição da antiga construção ocorreu em 2010 e a inauguração da nova arena em 18 de maio de 2013 no jogo entre Brasília x Brasiliense, na final do Campeonato Brasiliense de Futebol. Ainda naquele ano foram realizados os jogos da Copa das Confederações da FIFA Brasil, tendo sido o Estádio Nacional o palco de abertura dos jogos, situação mostrada na figura 6.1.



Figura 6.1 – Abertura da Copa das Confederações FIFA 2013

http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/sites/agenciabrasil/files/gallery_assist/26/gallery_assist723130/prev/ABr15062013DSC_7909.jpg acesso em 11 de abril de 2016.

A concepção das arquibancadas do Novo Estádio Nacional de Brasília é bastante diferente do padrão antigo de construção. Anteriormente eram adotados formatos elípticos ou até circulares para a disposição das arquibancadas, porém, na nova disposição, os assentos são dispostos de maneira quase que retangulares, trazendo o público para mais perto do campo. Além disso, uma maior inclinação é adotada na construção da estrutura, com o intuito de melhorar a visão do público, tendo em vista que o espectador da frente não atrapalha a visão daquele que está mais atrás.

A estrutura do estádio é composta por lajes, vigas, pilares e degraus de concreto armado. O arranjo estrutural é feito através de pórticos que contêm quatro linhas de pilares ligadas por vigas retas nos níveis intermediários e vigas inclinadas na parte superior, conforme mostrado na figura 6.2.

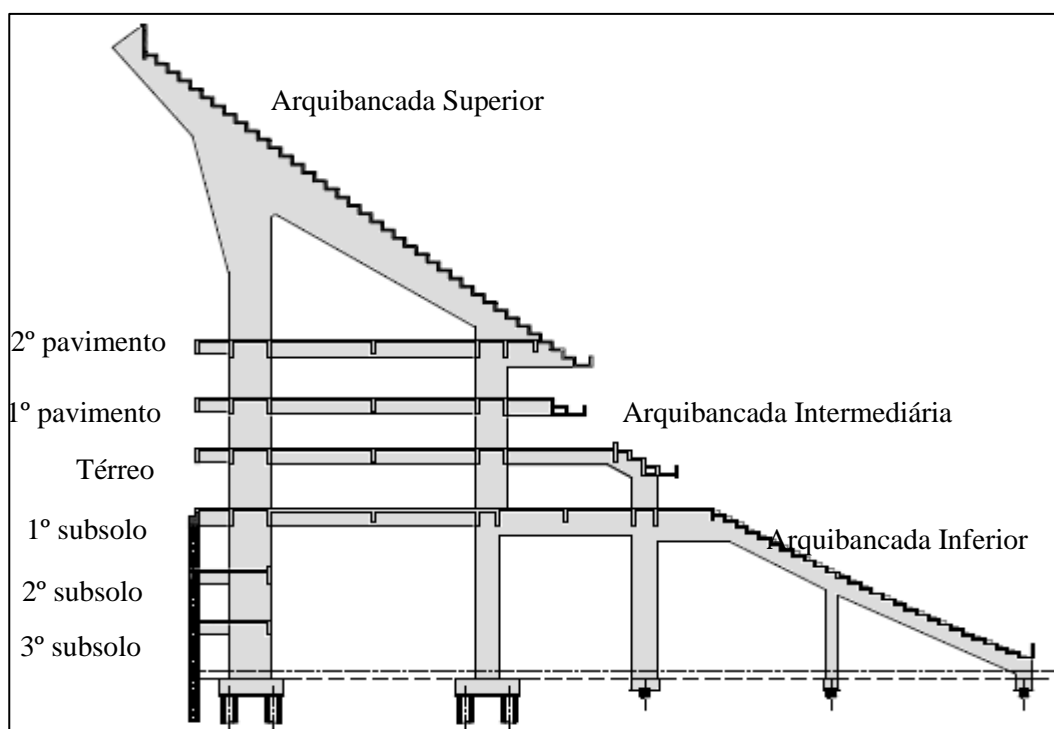
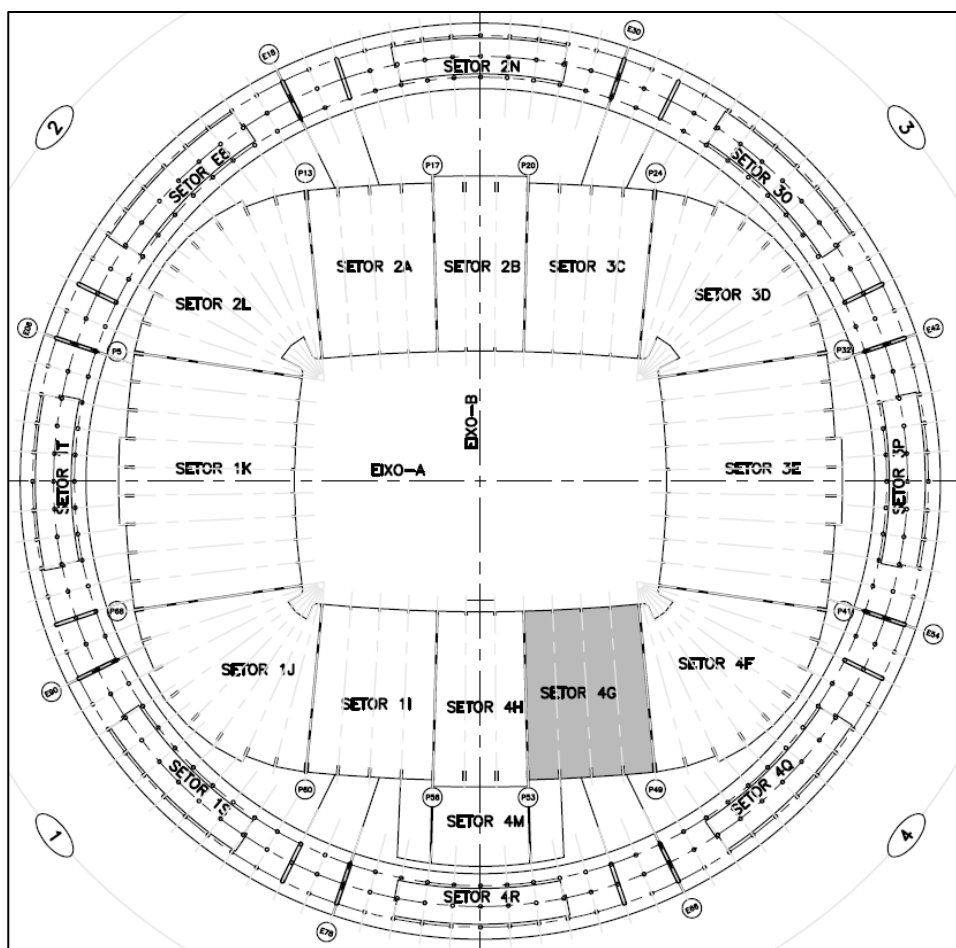


Figura 6.2 – Corte da arquibancada do Estádio Nacional – Lima (2013)

Conforme Lima (2013), as arquibancadas são apoiadas diretamente nas vigas inclinadas e estão divididas em três níveis, sendo apropriadas para comportar até 71.400 telespectadores. Nos níveis inferiores existem lajes maciças que se apoiam em vigas transversais e formam os pisos internos da estrutura, num total de seis patamares (3º, 2º e 1º subsolo, térreo, 1º e 2º pavimento). O autor comenta ainda que os níveis abaixo do 1º subsolo são destinados aos profissionais e à administração do estádio, além dos vestiários e das salas de apoio para a imprensa. Já os demais são destinados ao público. O térreo e o

1º pavimento são utilizados para acesso às arquibancadas intermediárias, áreas reservadas para salas de imprensa e camarotes *VIP*, enquanto que o 1º subsolo e o 2º pavimento dão acesso às arquibancadas inferior e superior, respectivamente.

As arquibancadas são construídas em doze setores independentes, separadas por juntas de dilatação, sendo três em cada lateral do campo, um atrás de cada gol e mais um em cada canto. A Figura 6.3 apresenta essa divisão. Lima (2013) explica que todas os setores têm a mesma seção transversal anteriormente mostrada e se diferenciam pela a quantidade de pórticos e, conseqüentemente, pela largura na direção tangencial. O autor comenta ainda que os setores laterais e de fundo são formados por pórticos paralelos, enquanto os de canto, por serem curvos, possuem pórticos distribuídos radialmente.



As arquibancadas são circunscritas por três linhas de pilares isolados, por onde se apoia uma cobertura circular, composta por uma coroa de concreto na parte externa e treliças metálicas na parte interna, cobertas por uma membrana especial que protege o público e parte do campo. As figuras 6.4 e 6.5 mostram a estrutura de cobertura em construção e concluída. Na primeira delas pode ser observada a separação estrutural existente entre a arquibancada e a cobertura do estádio.



Figura 6.4 – Cobertura do Estádio Nacional de Brasília em construção – Lima (2013)



Figura 6.5 – Vista do Estádio Nacional de Brasília

http://copa2014.gov.br/sites/default/files/galeria/brasilia_aerea_estadionacional_inauguracao1305_1830.jpg
acesso em 11 de abril de 2016

O estádio, que atualmente pertence à Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal, proporciona à cidade de Brasília a condição de receber grandes eventos esportivos e culturais, e deverá sediar jogos de futebol dos Jogos Olímpicos Rio 2016.

7. ANÁLISE NUMÉRICA

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pela análise numérica da estrutura. Primeiramente é apresentada a modelagem realizada, os tipos de elementos finitos e os parâmetros adotados no estudo. Logo após são apresentados os primeiros modos de vibração da arquibancada, os carregamentos aplicados, os pontos com maiores níveis de vibração e os valores de aceleração neles obtidos. Por fim é realizado um estudo de controle de vibração para a situação mais crítica de carregamento, com o uso de AMS e AMSM.

7.1. MODELAGEM NUMÉRICA

No tocante à geometria e parâmetros físicos, a modelagem numérica do Estádio é a mesma adotada por Lima (2013). A diferença básica ocorre na alteração dos modelos de carregamentos e na inserção dos AMS, necessários para o estudo de controle de vibrações de estrutura.

O pesquisador optou pela escolha do setor 4G, face à representatividade média das quatro possíveis escolhas. A estrutura conta com cinco pórticos paralelos e quatro vãos de lajes e degraus.

Para a modelagem geométrica são utilizados elementos tipo *shell* na simulação de lajes, degraus e paredes, além do pórtico da estrutura. Já as vigas internas são modeladas através de elementos do tipo *frame*. Ao todo são necessários 91.505 elementos de área e 3.100 de barra, em um total de 92.819 nós. O autor explica ainda que as peças são discretizadas conforme a geometria descrita na planta de formas. O material adotado é o concreto armado com Módulo de Elasticidade Secante (Ecs) igual a 30GPa. Para simular os blocos de fundação são adotados engastes nas bases dos pilares, de maneira que nenhum movimento de rotação ou translação seja possível. As figuras 7.1 a 7.3 ilustram o modelo discretizado, onde os elementos de casca são representados pela cor vermelha, enquanto os de barra estão na cor amarela.

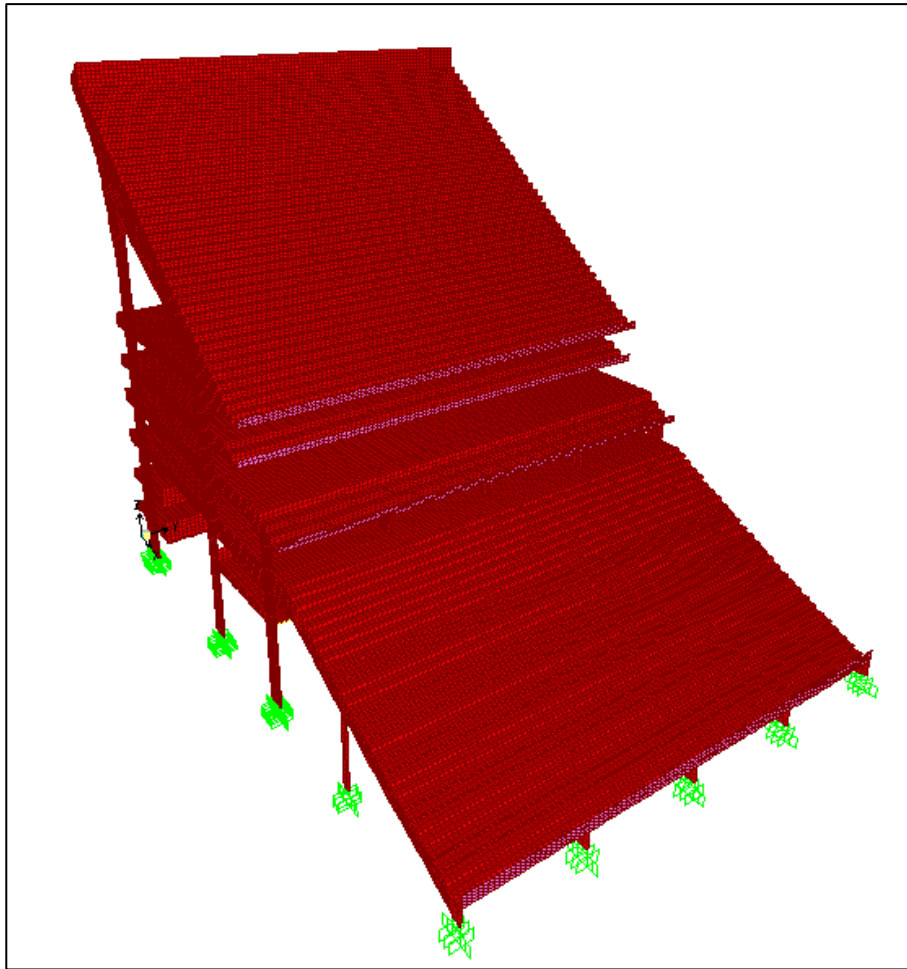


Figura 7.1 – Vista em perspectiva do modelo numérico

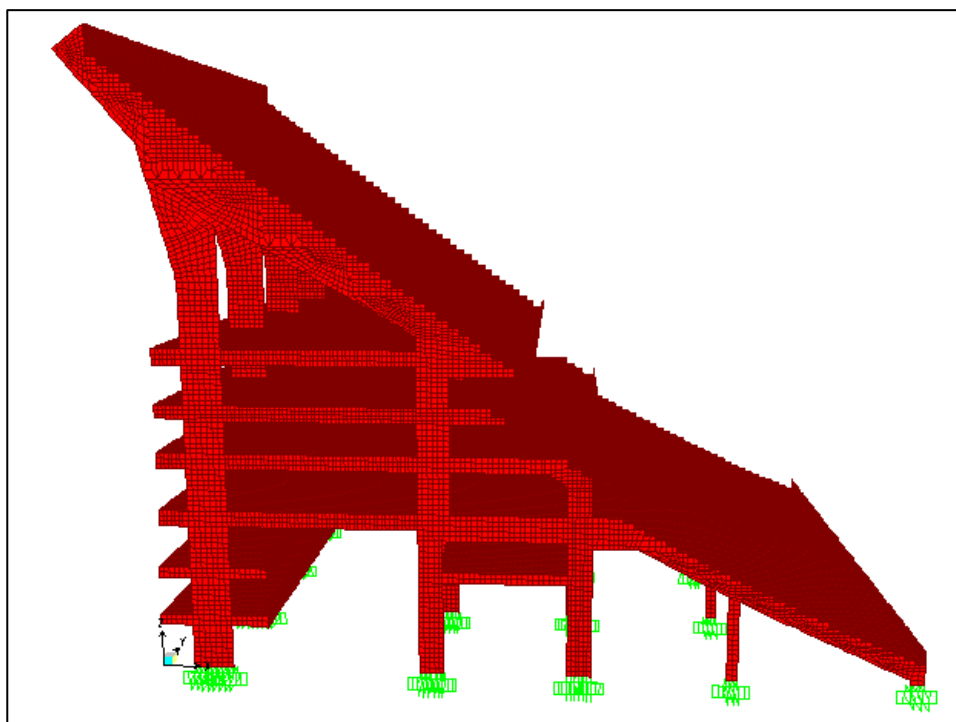


Figura 7.2 – Vista lateral do modelo numérico

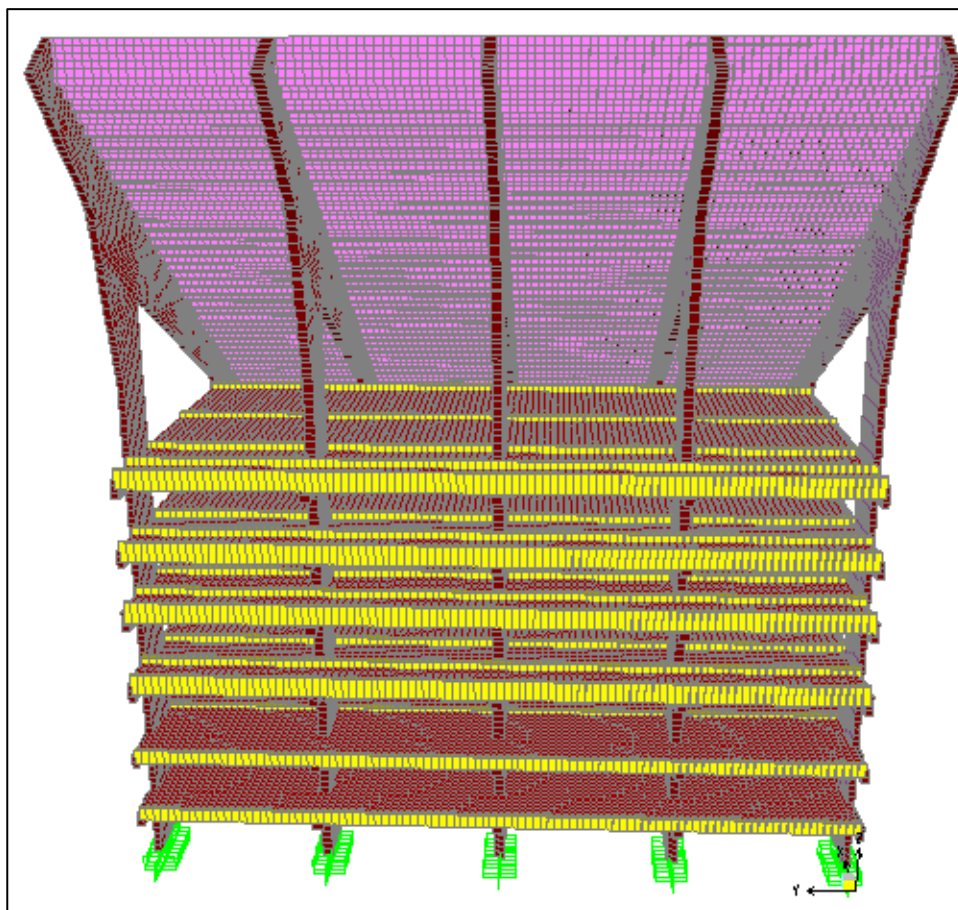


Figura 7.3 – Vista da parte posterior do estádio

Segundo o pesquisador, análises de convergência feitas com modelos mais simples mostraram que as respostas das análises modais convergem para elementos cujas dimensões fossem da ordem de 10% da maior dimensão da arquibancada. Todavia, face à complexidade da estrutura e da impossibilidade de geração de malhas de elementos a partir de um modelo base, optou-se por trabalhar com elementos cujas dimensões sejam de cerca de 100 vezes menor que a maior dimensão da estrutura.

É importante ressaltar que todos os parâmetros e seções transversais dos elementos estruturais adotados estão de acordo com o projeto de formas do estádio. É entendido que tais parâmetros e seções tenham sido exaustivamente verificados pela equipe de fiscalização durante a construção do estádio, tendo em vista a complexidade e importância da obra.

7.2. ANÁLISE MODAL DA ARQUIBANCADA

A grande quantidade de nós do modelo possibilita o cálculo de muitos modos de vibração, no entanto, frequências naturais cujos valores estejam muito acima das frequências de carregamento não apresentam grandes contribuições para o deslocamento estrutural.

Em seu trabalho sobre o estudo de conforto das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília, Lima (2013) adotou os 12 primeiros modos de vibração da estrutura. O autor realizou uma análise prévia e observou que, quando excitado, o sistema apresentava pouca alteração na resposta quando se considerava modos de vibração com frequências mais altas.

Já Campista (2015), que também realizou estudo de conforto das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília, levou em conta em sua análise os 15 primeiros modos de vibração do sistema.

Tendo em vista que esta análise trata da mesma arquibancada, adotam-se neste estudo os 20 primeiros modos de vibração da estrutura. Esta escolha decorre de dois fatores: a quantidade de modos escolhida supera a utilizada pelos dois pesquisadores, podendo ser considerada uma escolha conservadora, e o fato de o vigésimo modo de vibração ter frequência próxima ao terceiro harmônico do carregamento, que é próximo de 2,50Hz.

Ressalta-se que a resposta dinâmica do sistema é obtida através do método da superposição modal.

7.2.1. Modos de Vibração da Arquibancada

Os modos de vibração são determinados numericamente pelo software através de uma análise modal, utilizando um método de solução do problema de autovalores e autovetores, com tolerância de convergência igual a 1×10^{-9} . Abaixo são descritos os 20 primeiros modos de vibração encontrados. As figuras 7.4 a 7.11 ilustram as oito primeiras formas modais obtidas e a tabela 7.1 apresenta a descrição de cada um deles. As cores indicativas e as respectivas escalas de deslocamentos são apresentadas abaixo de cada figura. As demais formas modais da estrutura podem ser verificadas no anexo deste trabalho.

Tabela 7.1 – Descrição dos modos de vibração

Modo	Frequência (Hz)	Descrição
1	1,02	Flexão da estrutura na direção tangencial + leve torção no plano horizontal
2	2,27	Flexão na direção radial
3	2,48	Torção no plano horizontal + flexão dos pilares na direção radial
4	2,78	Flexão na direção tangencial
5	4,95	Flexão da estrutura na direção tangencial e flexão vertical da arquibancada superior
6	5,07	Flexão vertical da arquibancada superior + flexão dos pilares externos + leve flexão na direção radial
7	5,12	Flexão vertical da arquibancada superior + flexão pilares
8	5,48	Flexão na direção radial + flexão pilares + flexão vertical da arquibancada superior
9	5,71	Flexão na direção tangencial + torção no plano horizontal
10	6,31	Flexão vertical da arquibancada superior + flexão pilares
11	6,66	Flexão vertical da arquibancada superior + flexão na direção tangencial
12	6,67	Flexão vertical da arquibancada superior + leve flexão da arquibancada inferior + flexão na direção radial
13	6,77	Flexão vertical da arquibancada inferior + leve flexão vertical da arquibancada superior
14	6,78	Flexão vertical da arquibancada inferior
15	6,87	Flexão vertical da arquibancada inferior
16	7,08	Flexão da estrutura na direção tangencial + flexão vertical da arquibancada superior
17	7,31	Flexão vertical das lajes intermediárias
18	7,32	Flexão vertical das lajes intermediárias + leve flexão da arquibancada superior
19	7,58	Flexão vertical da arquibancada inferior
20	7,61	Flexão vertical da arquibancada superior + flexão vertical das lajes intermediárias

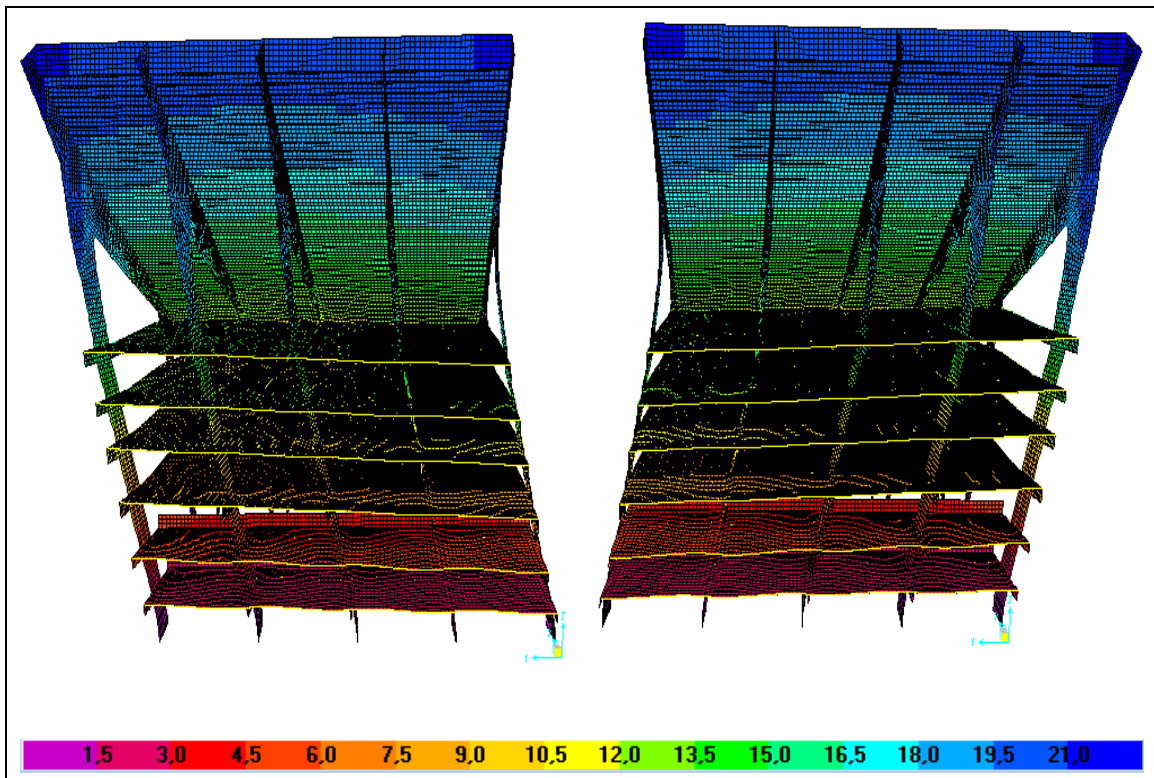


Figura 7.4 – 1º modo de vibração – $f_1 = 1,02\text{Hz}$ – Flexão tangencial da estrutura

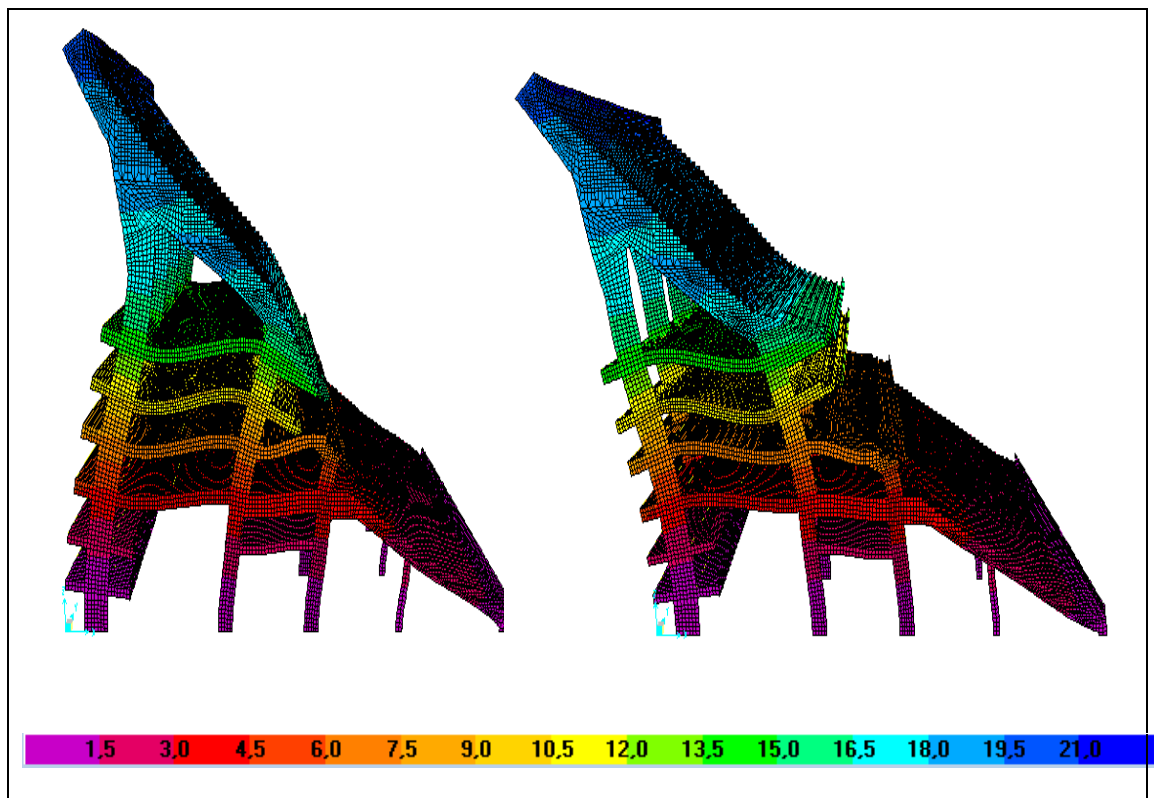


Figura 7.5 – 2º modo de vibração – $f_2 = 2,27\text{Hz}$ – Flexão radial da estrutura

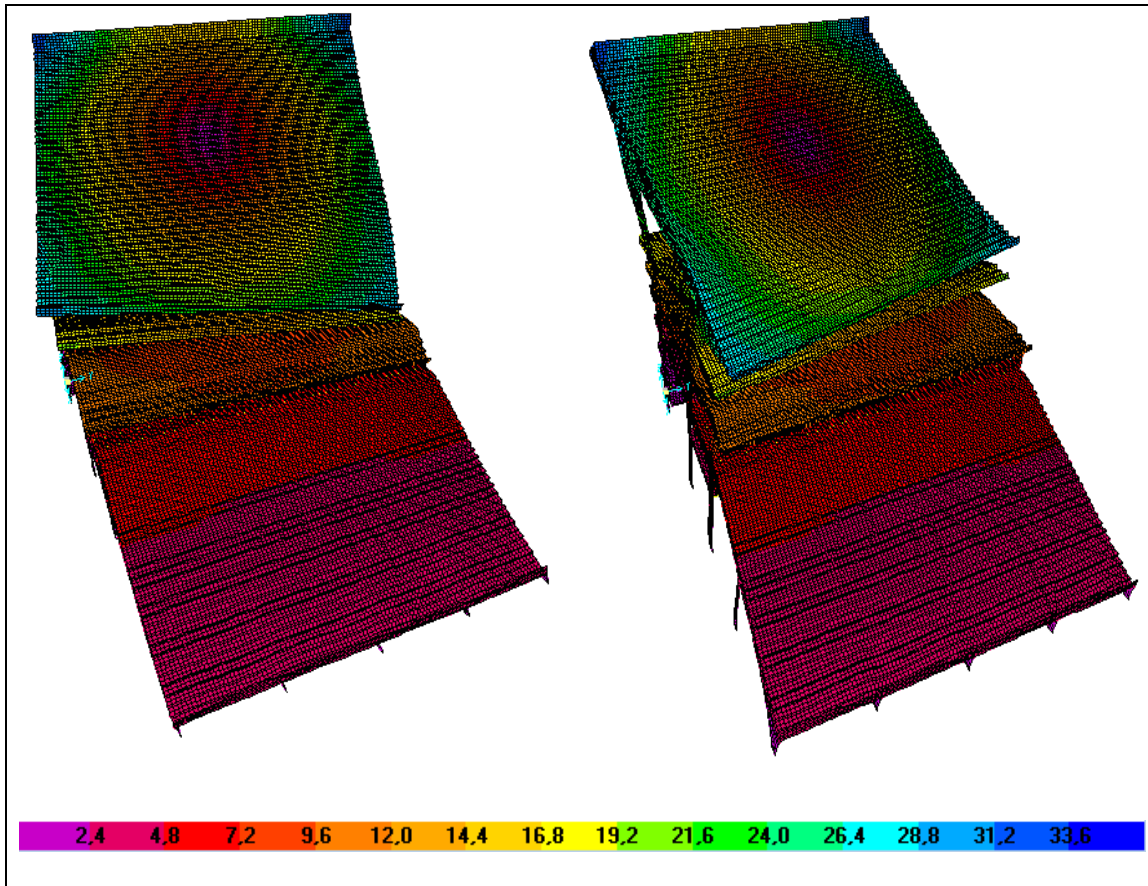


Figura 7.6 – 3º modo de vibração – $f_3 = 2,48\text{Hz}$ – Torção da arquivancada superior

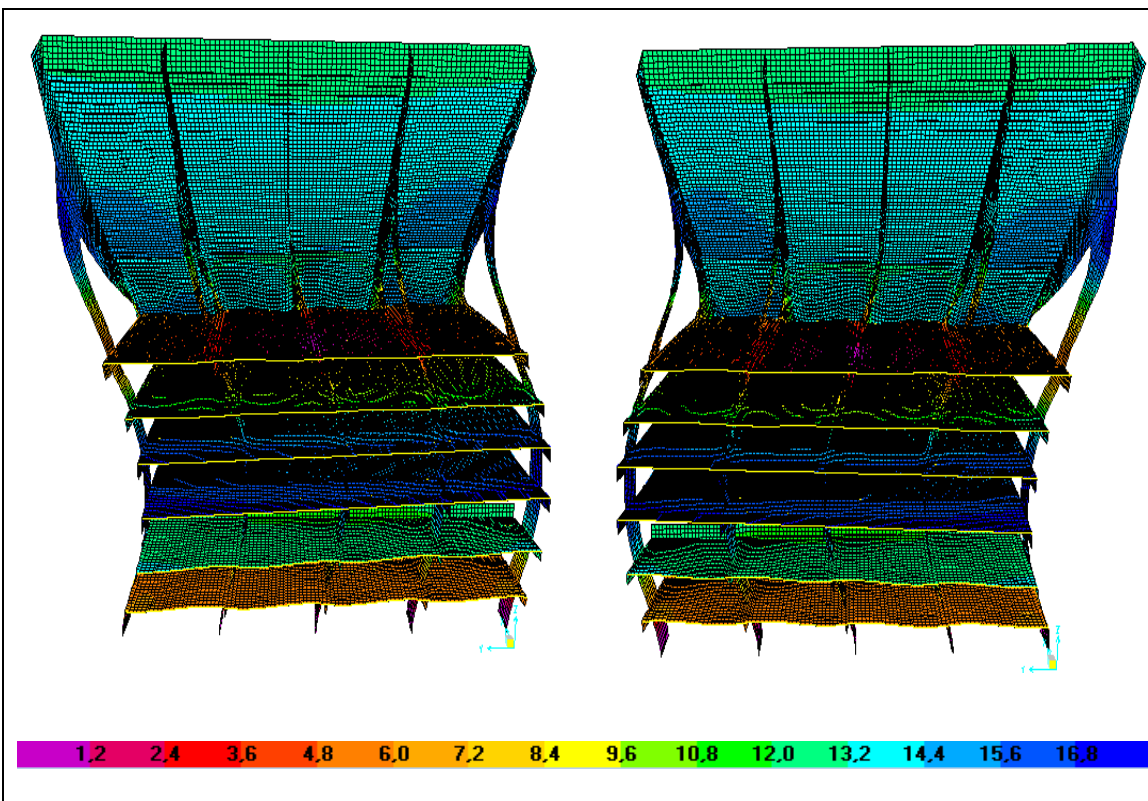


Figura 7.7 – 4º modo de vibração – $f_4 = 2,78\text{Hz}$ – Flexão tangencial da estrutura

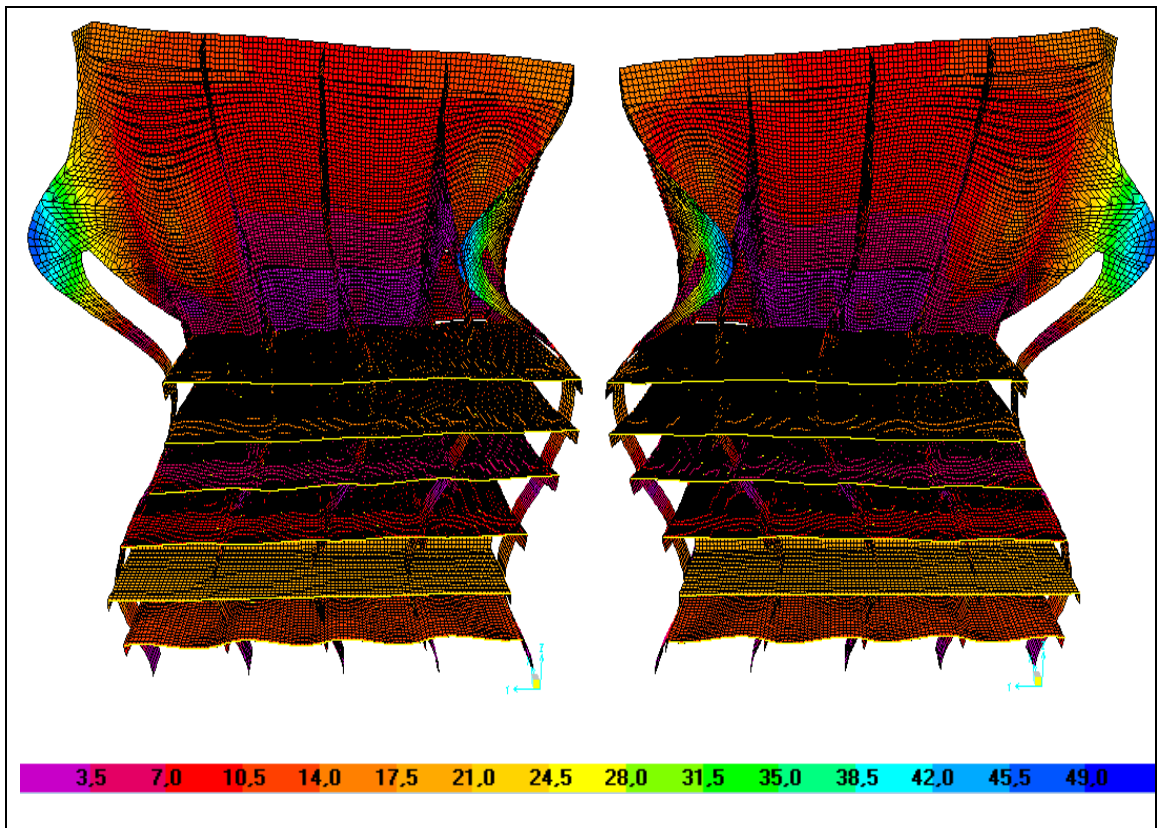


Figura 7.8 – 5º modo de vibração – $f_5 = 4,95\text{Hz}$ – Flexão tangencial da estrutura e flexão vertical da arquibancada superior

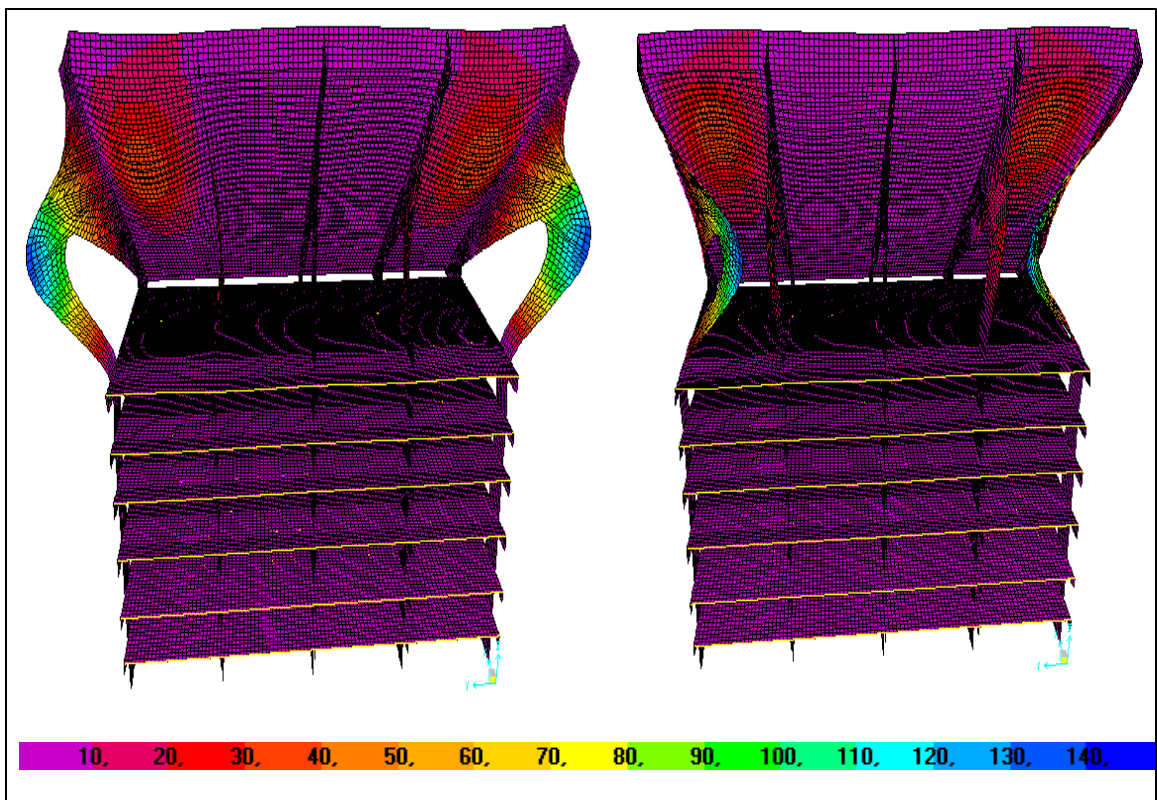


Figura 7.9 – 6º modo de vibração – $f_6 = 5,07\text{Hz}$ – Flexão dos pilares laterais e flexão vertical da arquibancada superior

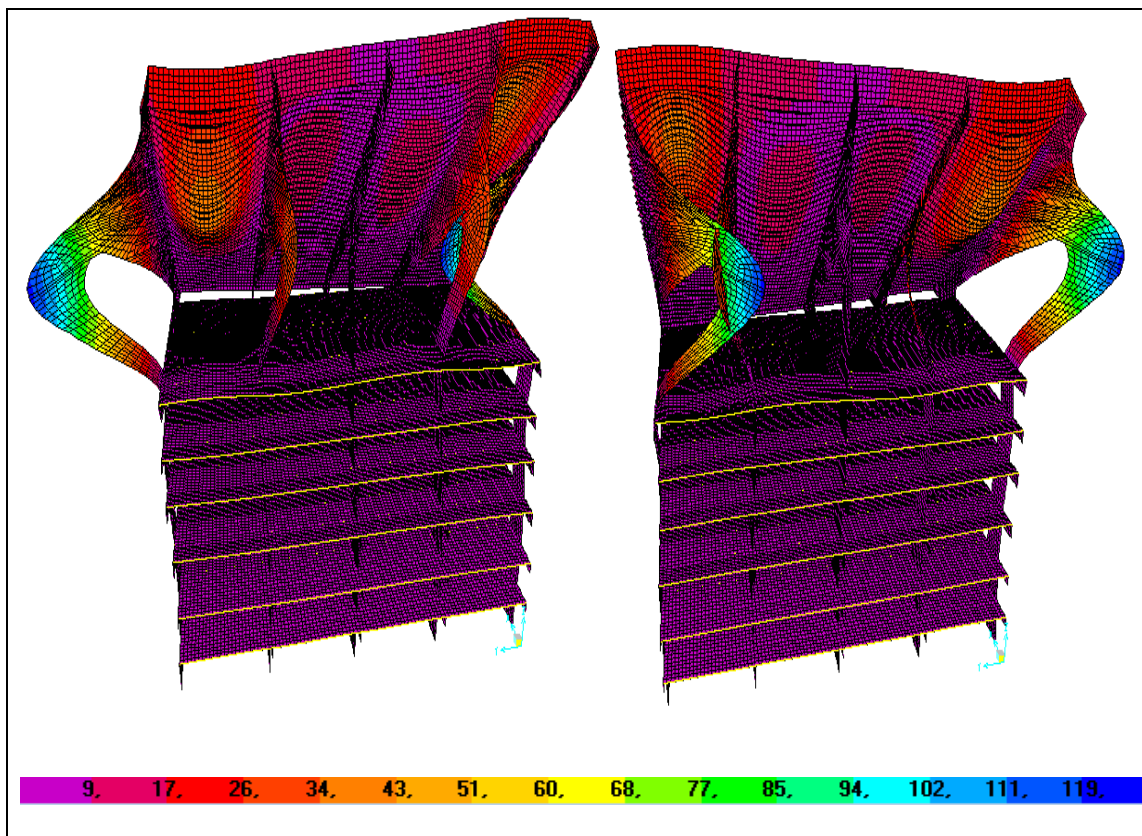


Figura 7.10 – 7º modo de vibração – $f_7 = 5,12\text{Hz}$ – Flexão dos pilares laterais e flexão vertical da arquibancada superior

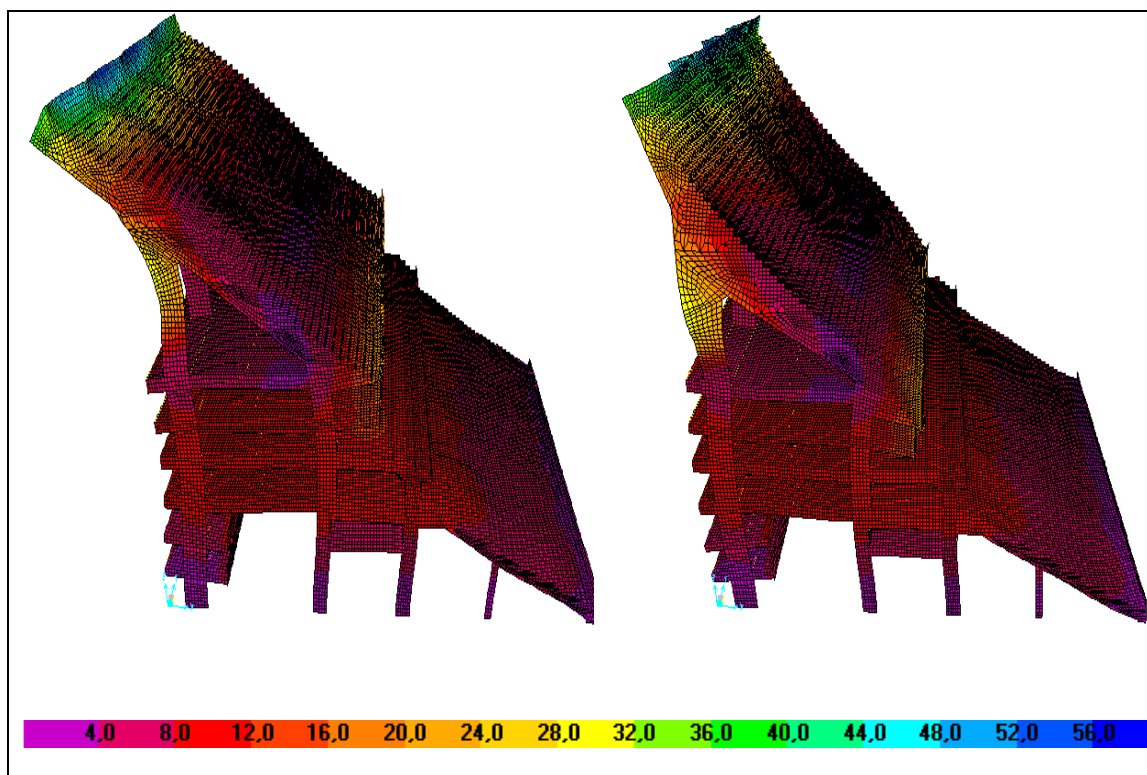


Figura 7.11 – 8º modo de vibração – $f_8 = 5,48\text{Hz}$ – Flexão radial da estrutura

Conforme já relatado por Lima (2013) e Campista (2015), os cinco primeiros modos de vibração apresentam a movimentação da estrutura de maneira global. A partir do sexto modo já se observa deslocamentos localizados na parte superior dos pilares laterais, além de torções e flexões nas arquibancadas superior e inferior.

Da análise modal se observa que a estrutura possui as quatro primeiras frequências naturais com valores dentro da faixa de frequências características das atividades desenvolvidas por seres humanos, cujos valores variam entre 1,5 a 3,0Hz, conforme indica a tabela 3.1 do CEB 209 (1991). Essa situação pode ser preocupante, pois sugere a possibilidade de amplificação das vibrações pelo efeito da ressonância. Além disso, a estrutura possui modos com autovalores próximos ao segundo e terceiro harmônicos da faixa de frequência de carregamentos, situação que também poderá acarretar em grandes oscilações do sistema.

Da análise modal pode ser observado também que a estrutura não atende ao critério de frequência estabelecido pela NBR 6118 (2014). A norma estabelece que toda estrutura deve possuir frequência fundamental superior a 1,2 vezes o valor da frequência crítica (f_{crit}) apresentada. Apesar da norma não tratar o caso específico de arquibancadas, é previsto o valor de f_{crit} igual a 8,0Hz para Ginásio de Esportes, de onde se supõe que a primeira frequência natural da estrutura deva ser superior a 9,6Hz.

7.3. ANÁLISE DINÂMICA DA ARQUIBANCADA

7.3.1. Modelagem do Carregamento

Para a modelagem do carregamento dinâmico, diversos pesquisadores como Rodrigues (1998, 2003), Faísca (2003), Lima (2007), Barros (2009), Martins (2011), Silva (2012), Lima (2013) e Campista (2015) aplicaram em suas modelagens o carregamento “saltar”, descrito matematicamente por Bachmann et al (1987). Esta função está apresentada no capítulo 3 e pode ser descrita por uma soma de pulsos semi-senoidais. Isso significa que existe uma parte de valor positivo com um pico bem definido, que ocorre quando o indivíduo está em contato com a estrutura e uma parte de valor nulo, quando este se encontra no ar.

Este tipo de carregamento pode ser escrito a partir de uma série de Fourier, conforme mostram as equações 3.24 ou 3.25, no entanto, pode ser observada uma grande variação nos parâmetros a serem adotados em função das frequências de excitação, o que dificulta a análise para distintos valores de frequência. Por outro lado, na modelagem do carregamento proposto por Faísca (2003), equação 3.26, a situação é bastante simplificada. Na proposta a pesquisadora utiliza a função *Hanning* e as diferenças passam a ser apenas na frequência ou período, no tempo de contato, no coeficiente de impacto, e no coeficiente de defasagem. Assim, utiliza-se neste trabalho a proposta apresentada pela referida autora.

As frequências de excitação do carregamento dinâmico devido à torcida são escolhidas com o intuito de se encontrar a situação mais desfavorável para o conforto humano nas arquibancadas. Conforme apresentado na análise modal, a estrutura possui diversos modos de vibração com baixos valores de frequência, não sendo possível à priori definir um valor que majore os efeitos de vibração. Dessa forma, são adotados 15 diferentes valores de frequências de excitação, variando de 2,10 Hz a 2,80Hz em passos de 0,05Hz. A tabela 7.2 apresenta os valores utilizados, bem como uma breve explicação dos modos que poderão ser excitados:

Tabela 7.2 – Frequências de excitação adotadas no modelo numérico

	Freq. (Hz)	Descrição
1	2,10	Próximo à ressonância com o segundo modo de vibração.
2	2,15	Próximo à ressonância com o segundo modo de vibração.
3	2,20	Próximo à ressonância com o segundo modo de vibração.
4	2,25	Próximo à ressonância com o segundo modo de vibração.
5	2,30	Próximo à ressonância com o segundo modo de vibração.
6	2,35	Próximo à ressonância com o terceiro modo de vibração.
7	2,40	Próximo à ressonância com o terceiro modo, além de segundo harmônico estar próximo à ressonância com o quinto modo de vibração.
8	2,45	Próximo à ressonância com o terceiro modo, além de segundo harmônico estar próximo à ressonância com o quinto modo de vibração.
9	2,50	Próximo à ressonância com o terceiro modo, além de segundo harmônico estar próximo à ressonância com o quinto, sexto e sétimo modo de vibração.
10	2,55	Próximo à ressonância com o terceiro modo, além de segundo harmônico estar próximo à ressonância com o quinto, sexto e sétimo modo de vibração.
11	2,60	Próximo à ressonância com o terceiro modo, além de segundo harmônico estar próximo à ressonância com o quinto, sexto e sétimo modo de vibração.
12	2,65	Próximo à ressonância com o quarto modo, além de segundo harmônico estar próximo à ressonância com o oitavo e nono modo de vibração.
13	2,70	Próximo à ressonância com o quarto modo, além de segundo harmônico estar próximo à ressonância com o oitavo e nono modo de vibração.
14	2,75	Próximo à ressonância com o quarto modo, além de segundo harmônico estar próximo à ressonância com o oitavo e nono modo de vibração.
15	2,80	Próximo à ressonância com o quarto modo, além de segundo harmônico estar próximo à ressonância com o oitavo e nono modo de vibração.

Uma vez feita a escolha do modelo de carregamento e das frequências a serem consideradas, resta definir os demais parâmetros, como o tempo de contato (t_c) e o coeficiente de impacto (k_p). Para a definição do t_c adota-se a regressão polinomial obtida por Lima (2013). O autor obteve a curva da variação da taxa dada pelo tempo de contato e o período da função (T_p) em função da frequência característica, conforme apresentado na figura 7.12. Para a obtenção da curva, o autor utilizou os dados obtidos experimentalmente por Faísca (2003), apresentados em resumo na tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Tempos de contato medidos experimentalmente – Faisca (2003)

f_s (Hz)	T_p (s)	t_c (s)	t_c/T_p
2,00	0,50	0,36	0,72
2,27	0,44	0,33	0,75
2,50	0,40	0,32	0,80
2,70	0,37	0,33	0,89

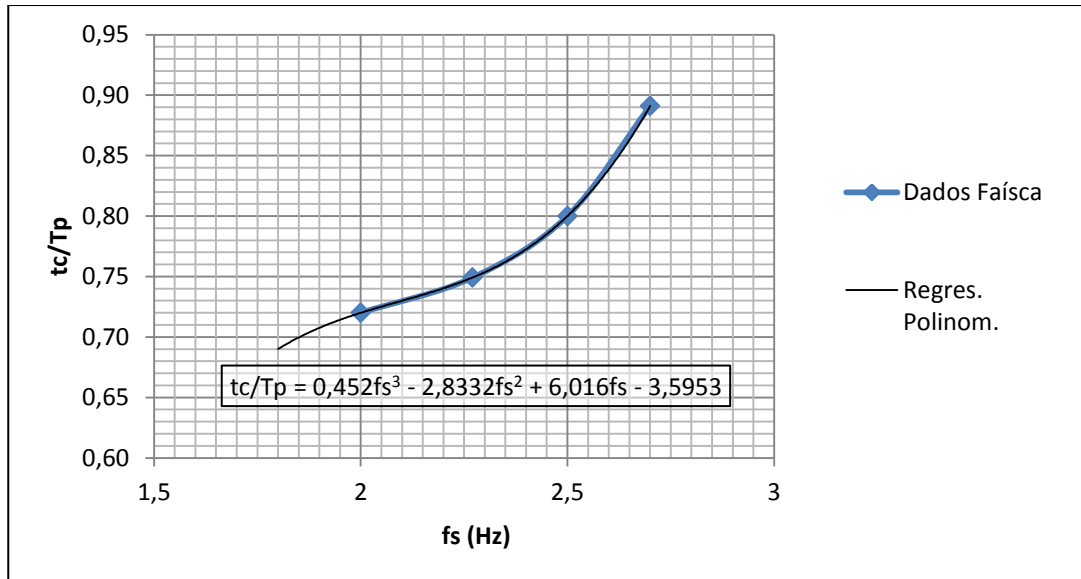


Figura 7.12 – Relação entre tempo de contato pelo período em função da frequência característica – Lima (2013)

Em função da regressão obtida e das frequências de excitação utilizadas foram calculados os valores da razão entre o tempo de contato e os períodos adotados neste trabalho.

Para o cálculo da grandeza dada pela multiplicação do coeficiente de impacto (k_p) pelo coeficiente de defasagem (CD) foi adotada a formulação proposta por Sim (2006) apud Lima (2013). Conforme o pesquisador, a equação 7.1 alcança valores muito próximos aos propostos por Faisca (2003) nas frequências apresentadas em seu estudo.

$$CD \cdot k_p = \frac{\pi}{\left(2 \cdot \frac{t_c}{T_p}\right)} \quad 7.1$$

A tabela 7.4 apresenta os valores obtidos para as razões de tempo de contato e período do carregamento (t_c/T_p), bem como os coeficientes de impacto adotados, em função das frequências de excitação.

Tabela 7.4 – Parâmetros utilizados nos carregamentos dinâmicos

f_s (Hz)	T_p (s)	t_c/T_p	t_c (s)	$CD.k_p$
2,10	0,476	0,730	0,348	2,15
2,15	0,465	0,735	0,342	2,14
2,20	0,455	0,740	0,336	2,12
2,25	0,444	0,746	0,332	2,11
2,30	0,435	0,753	0,328	2,09
2,35	0,426	0,762	0,324	2,06
2,40	0,417	0,772	0,322	2,03
2,45	0,408	0,785	0,320	2,00
2,50	0,400	0,800	0,320	1,96
2,55	0,392	0,817	0,321	1,92
2,60	0,385	0,838	0,322	1,87
2,65	0,377	0,863	0,325	1,82
2,70	0,370	0,891	0,330	1,76
2,75	0,364	0,923	0,336	1,70
2,80	0,357	0,960	0,343	1,64

O carregamento que simula a atuação da torcida é aplicado da seguinte forma: para as arquibancadas inferiores é tomado o valor médio de 1,6kN/m² calculado por Lima (2013), onde o autor considera o peso médio de cada indivíduo sendo igual a 800N, o total de lugares existentes no estádio e a área total de arquibancadas. Para as arquibancadas superiores é conservadoramente suposta a possibilidade de se ter uma ocupação um pouco maior que o número de assentos disponíveis, sendo adotada a carga de 1,8kN/m².

Por outro lado, para as intermediárias, é utilizado 1kN/m², pelo fato de se tratar de uma área de camarotes e de salas de imprensa com menor ocupação por parte do público.

Em relação à ocupação da torcida são considerados cinco cenários distintos. O primeiro modelo de carregamento, chamado de MC1 considera que apenas uma lateral, que

representa 25% da área das arquibancadas está tomada pelo público. Além de ser uma condição possível devido à separação da torcida em clássicos, ou mesmo de alguma interdição de parte da arquibancada, essa situação é interessante pelo fato de aplicar cargas de maneira excêntrica na estrutura e, com isso, excitar algum modo que tenha torção ou deslocamentos no sentido tangencial. A figura 7.13 ilustra a situação definida como MC1.

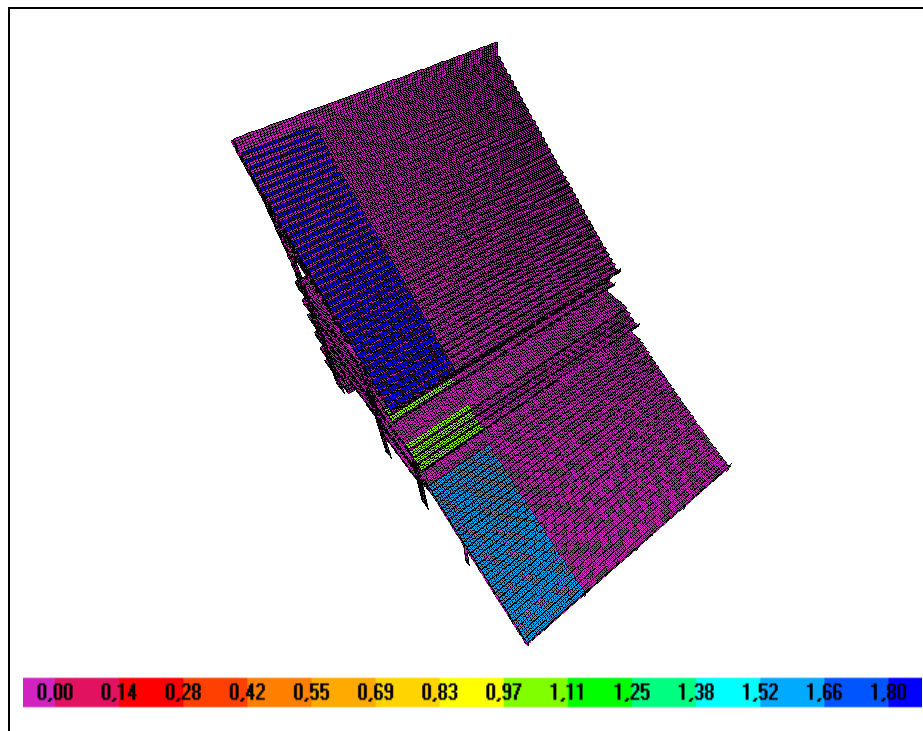


Figura 7.13 – Ocupação das arquibancadas no modelo MC1 – Escala em [kN/m²]

O segundo modelo de carregamento, chamado de MC2 considera que as duas laterais da arquibancada estão ocupadas pelo público, representando 50% de carregamento da estrutura. É também uma situação possível devido à divisão de torcidas ou mesmo pela interdição de parte da arquibancada, além de ser interessante na análise dos modos de vibração que possuem flexão da arquibancada no sentido vertical. A figura 7.14 ilustra o carregamento MC2.

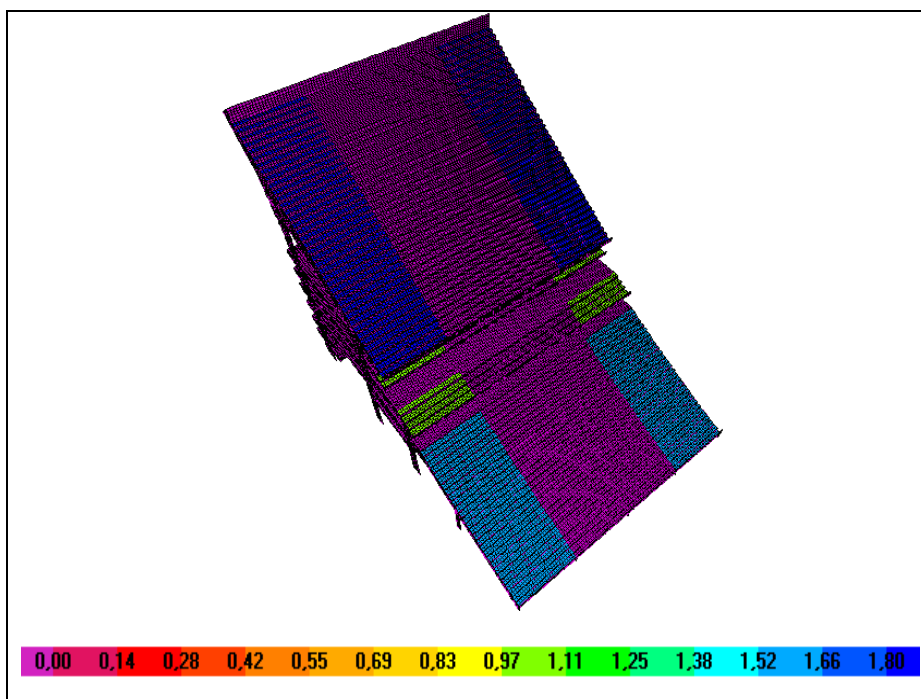


Figura 7.14 – Ocupação das arribancadas no modelo MC2 – Escala em [kN/m²]

O terceiro modelo de carregamento, MC3, considera a metade da arribancada ocupada pelos torcedores. Assim como no modelo MC1, esta situação também pode estimular algum dos modos de flexão no sentido radial ou mesmo de torção da estrutura, devido à excentricidade da aplicação das cargas. No mais, é também uma situação possível devido à divisão de torcidas ou mesmo pela interdição de parte da arribancada. A figura 7.15 ilustra o carregamento MC3.

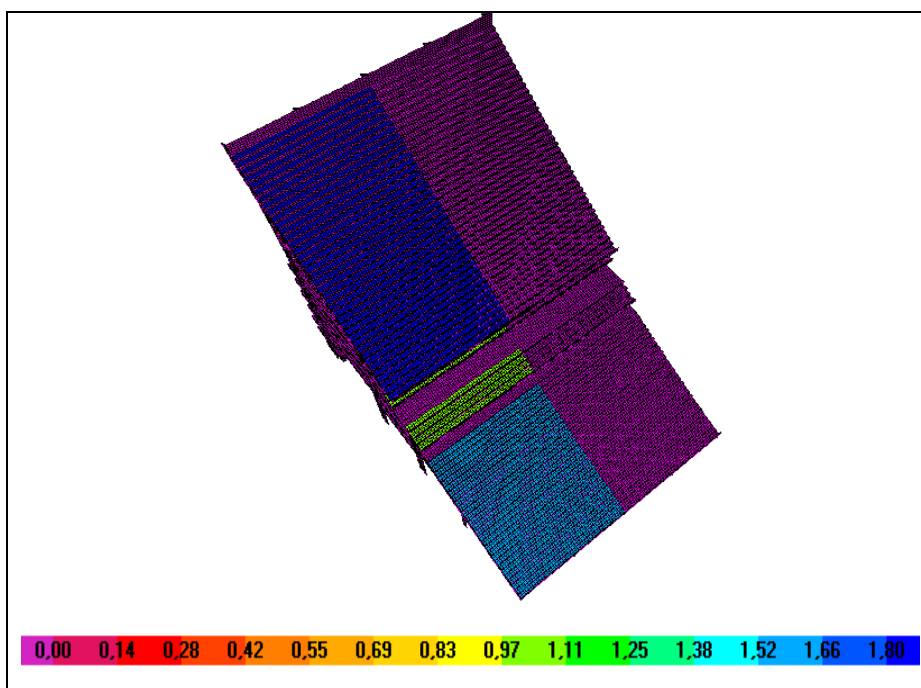


Figura 7.15 – Ocupação das arribancadas no modelo MC3 – Escala em [kN/m²]

O quarto modelo de carregamento, MC4, considera que apenas as arquibancadas superior e intermediária estão ocupadas pela torcida. É também uma situação possível face à necessidade de interdição da área inferior das arquibancadas para alguma manutenção, por exemplo. A figura 7.16 ilustra a situação descrita.

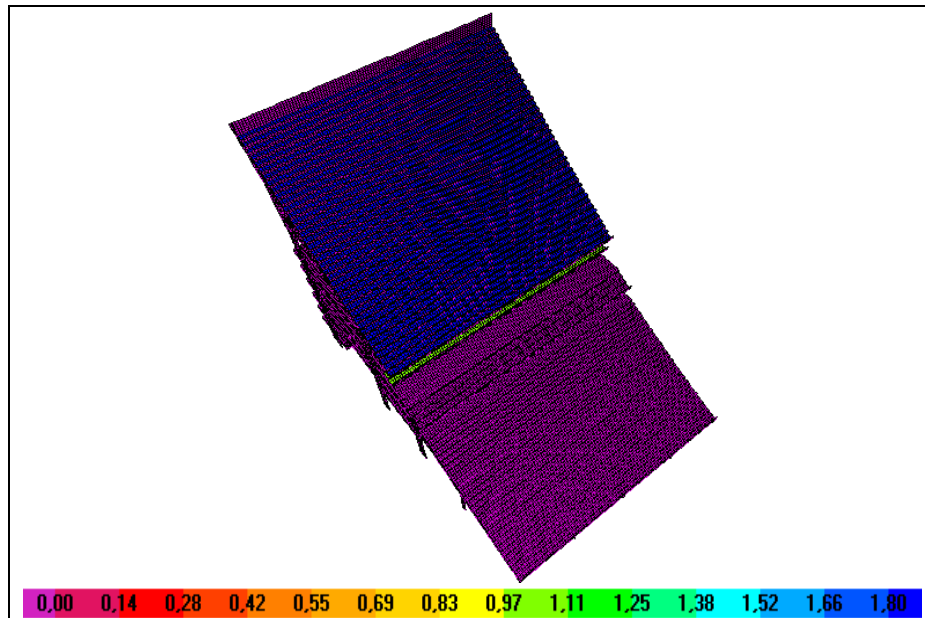


Figura 7.16 – Ocupação das arquibancadas no modelo MC4 – Escala em [kN/m²]

O quinto modelo de carregamento, MC5, considera as arquibancadas totalmente tomadas pelo público, sendo a situação mais comum de se encontrar no estádio em dias de grandes eventos. A figura 7.17 apresenta a situação estudada.

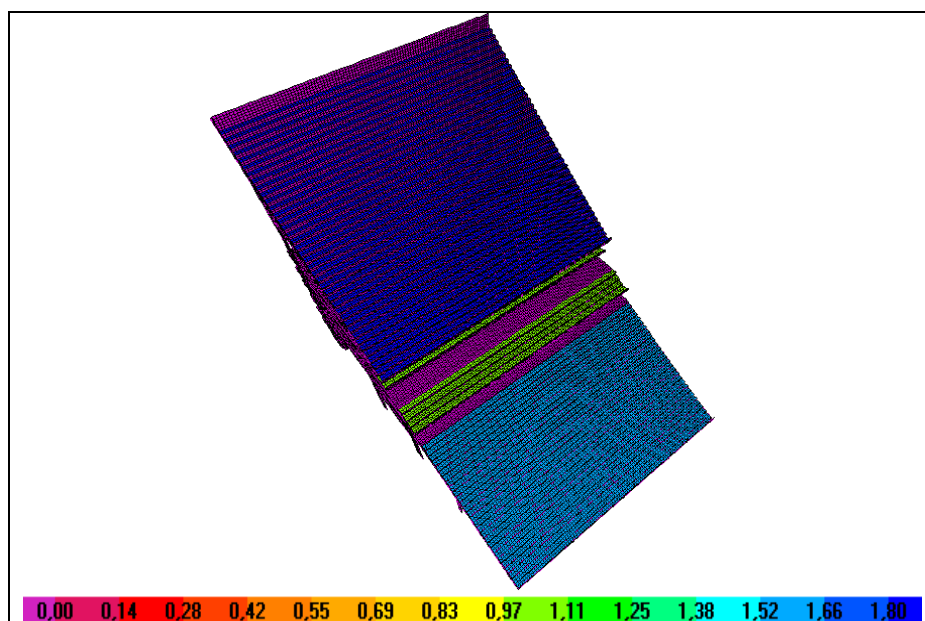


Figura 7.17 – Ocupação das arquibancadas no modelo MC5 – Escala em [kN/m²]

Os pontos de leitura das respostas dinâmicas foram escolhidos a partir dos maiores deslocamentos encontrados na análise modal e coincidem com os utilizados tanto por Lima (2013), quanto por Campista (2015). Os pontos escolhidos e os nós representantes são apresentados na tabela 7.5 e figura 7.18.

Tabela 7.5 – Pontos para leitura das acelerações

Ponto	Nó	Descrição
1	12281	Penúltimo nó na extremidade do último degrau.
2	10324	Nó no meio do primeiro vão, na altura do pilar.
3	3224	Último nó na extremidade do primeiro degrau.
4	33276	Nó no último degrau, na região central da arquibancada.

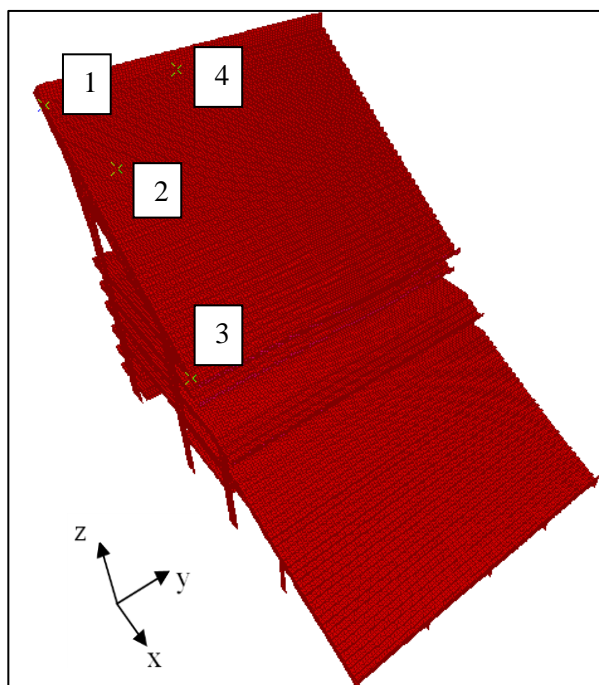


Figura 7.18 – Pontos de leitura das acelerações

O ponto 1 está na extremidade do último degrau da arquibancada superior e apresenta deslocamentos nas três direções. Para a direção “X”, observa-se grande contribuição devido aos modos 2 e 8, que apresentam flexão na direção radial. Para a direção “Y” colaboram com o deslocamento os modos 1, 4, 5 e 16, por apresentarem flexão no sentido tangencial. O ponto ainda se movimenta horizontalmente nos modos 3 e 9, que apresentam torção no plano “XY”, modos que podem colaborar tanto para os deslocamentos em “X” quanto em “Y”. Em relação à movimentação no sentido vertical

participam os modos 2 e 8, por apresentarem flexão no sentido radial, além dos modos 5, 7, 9, 10, 11, 12, 16, 18 e 20, por apresentarem flexão da arquibancada superior.

O ponto 2 se encontra no meio do primeiro vão da arquibancada superior e também apresenta deslocamentos nos três sentidos. Assim como para o ponto anterior, as movimentações na horizontal “X” decorrem da flexão radial dos modos 2 e 8, além da torção existente nos modos 3 e 9. Para a direção “Y” colaboram os modos 1, 4, 5 e 16, por apresentarem flexão no sentido tangencial. Por outro lado, para a direção “Z” os deslocamentos principais decorrem da flexão da arquibancada superior, ou seja, modos 5, 6, 7, 10, 13, 16 e 18.

O ponto 3 se encontra na extremidade do primeiro degrau da arquibancada e também se desloca nos três eixos. Para o sentido tangencial colaboram os modos 1 e 4, que apresentam flexão neste sentido, além dos modos 3 e 9, que apresentam torção no plano “XY”. Com relação à movimentação radial colaboram os modos 2 e 8, que apresentam flexão radial, além dos modos 3 e 9 que apresentam torção no plano “XY”. E com relação ao eixo vertical colaboram os modos 2 e 8, que apresentam flexão radial da arquibancada, os modos 3 e 9, devido à torção da arquibancada superior.

O ponto 4 possui deslocamentos no sentido radial devido aos modos 2 e 8, face à flexão da arquibancada nesse sentido. Para o sentido tangencial colabora os modos 1, 4, 5 e 16, por apresentarem flexão nessa direção e para o sentido vertical colaboram os modos 2 e 8, que apresentam flexão radial da arquibancada e os modos 13 e 15, que apresentam flexão da arquibancada superior.

7.3.2. Aplicação do carregamento

O carregamento dinâmico é aplicado a partir da função de cargas, sendo adotada a função *Hanning* (BRIGHAM, 1988), para o intervalo de tempo em que o indivíduo se encontra em contato com a estrutura, e o valor nulo, para o intervalo em que o saltador está no ar. Para a análise numérica é adotada a discretização da função em 20 intervalos de tempo iguais, de onde são obtidos os valores das abscissas e das ordenadas que fazem a variação da carga no tempo. A figura 7.19 mostra a função obtida para a frequência de carregamento igual a 2,55Hz.

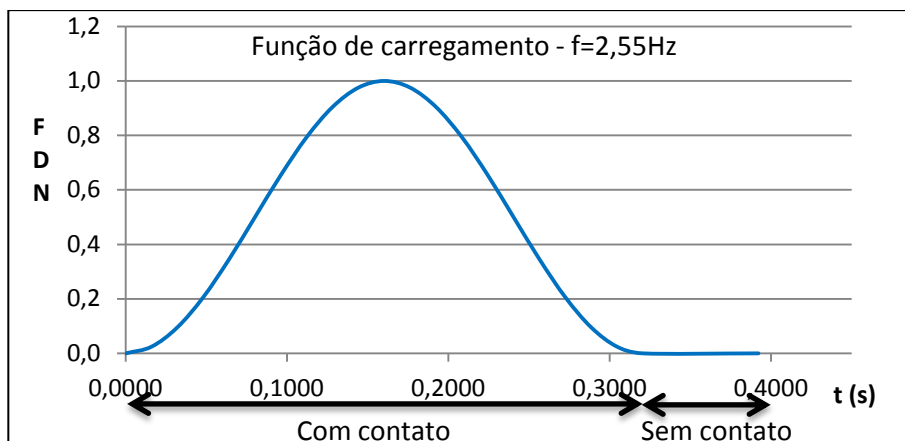


Figura 7.19 – Função de carga para frequência igual a 2,55Hz

A simulação dos saltos dos torcedores é feita através da entrada de 15 funções de carga, sempre no tempo igual a algum dos múltiplos do período da atividade, ou seja, são modelados 15 saltos dos torcedores, totalizando um tempo de aproximadamente 5,5 segundos. A curva final de excitação para frequência igual a 2,55Hz pode ser vista na figura 7.20, enquanto que a transformada de Fourier da referida curva é apresentada na figura 7.21, mostrando os picos de transferência de energia do carregamento ao sistema principal. Ressalta-se que escolha pela quantidade de ciclos de carga utilizada neste trabalho decorreu de estudos prévios que mostraram que este número foi suficiente para que se atingisse a resposta permanente do sistema e se tivesse um tempo de carga suficiente para o cálculo das acelerações em *RMS* e em *VDV*.

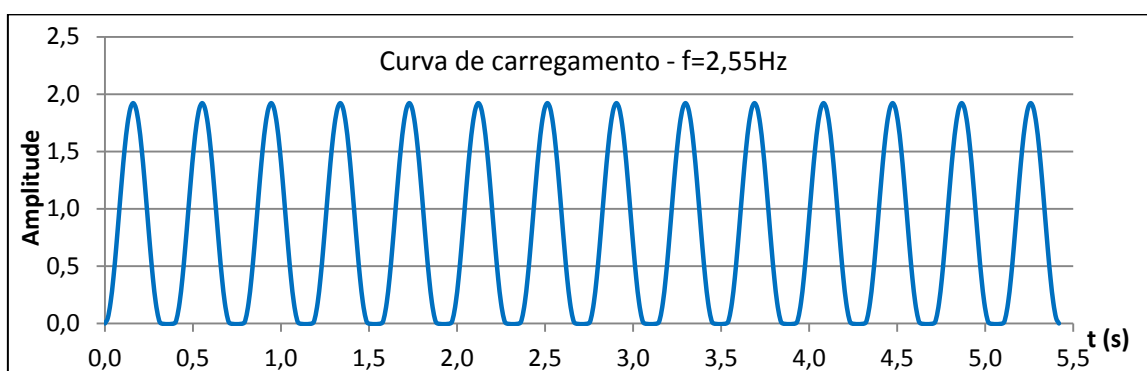


Figura 7.20 – Carregamento de torcida para a frequência de 2,55Hz

O intervalo de integração (Δ_t) adotado para a análise transiente é de 0,01 segundos, sendo utilizados 1000 pontos de cálculo, que totalizam 10 segundos de análise. É importante frisar que o intervalo de integração não equivale aos 20 intervalos de discretização da função. O primeiro deles diz respeito à quantidade de pontos em que se divide o carregamento dinâmico para a realização da análise transiente, ao passo que a discretização da função é necessária para dar forma à função de carga.

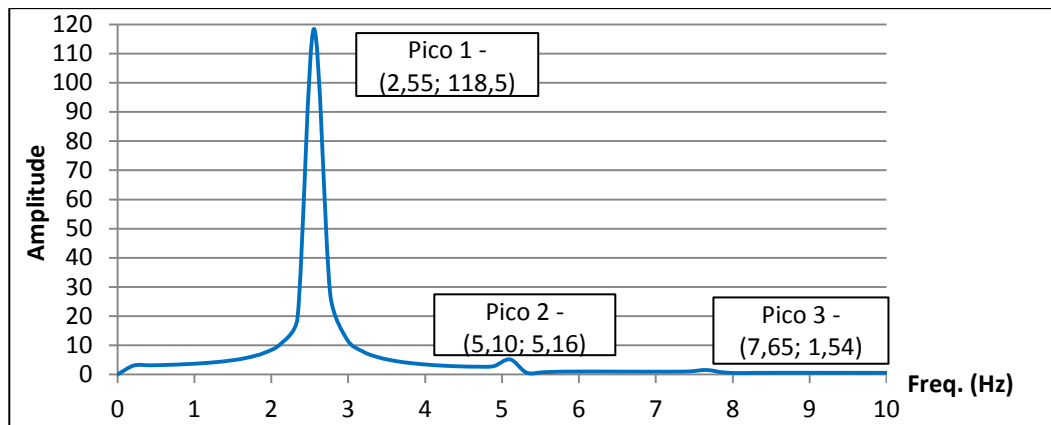


Figura 7.21 – Transformada de Fourier para o carregamento com frequência de 2,55Hz

7.3.3. Amortecimento Estrutural

Para a realização deste trabalho o amortecimento estrutural tomado é igual a 2% do amortecimento crítico (c_c) para todos os modos de vibração. Observa-se que o valor de amortecimento utilizado encontra-se na média do recomendado pela ISO 10137 (2007) para estudos dinâmicos preliminares, que, segundo a norma, se situa entre 1% a 3%.

7.4. ANÁLISE DE VIBRAÇÃO FORÇADA

Nesta análise são apresentadas as respostas em termos de aceleração para os modelos de cálculo e frequências de excitação estudadas, cujos resultados são obtidos a partir do método da superposição modal.

Os resultados são apresentados para os três eixos, da seguinte forma: acelerações em “X” (direção radial), acelerações em “Y” (direção tangencial) e acelerações em “Z” (direção vertical).

7.4.1. Acelerações obtidas para o MC1

Conforme explicado no item 7.3 são criados cinco modelos de cálculo com 15 frequências de excitação em cada modelo para a verificação das respostas do sistema em termos de vibrações. Para a realização dessa tarefa são tomadas leituras das acelerações nos quatro pontos distintos da arquibancada previamente definidos, escolhidos em função dos maiores deslocamentos obtidos na análise modal. Os pontos de leitura e a disposição da torcida na arquibancada podem ser verificados na figura 7.22.

Os resultados obtidos para o primeiro modelo de cálculo, que leva em conta a ocupação de apenas 25% da área total da arquibancada, são apresentados nas figuras 7.23 a 7.26.

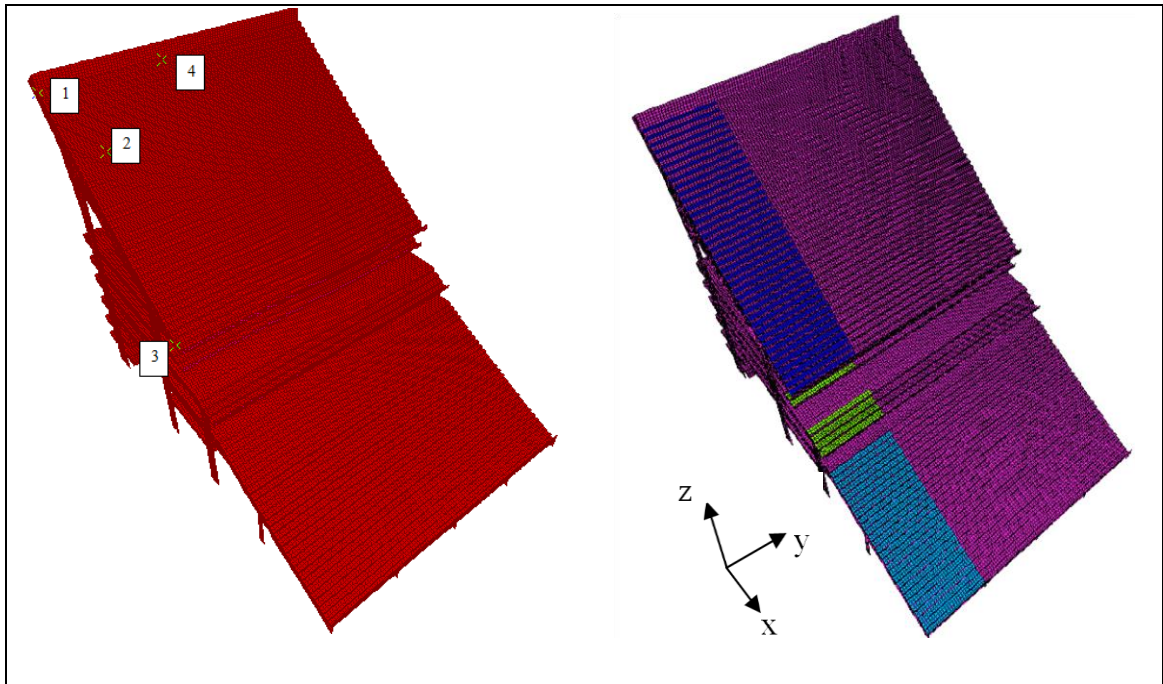


Figura 7.22 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC1

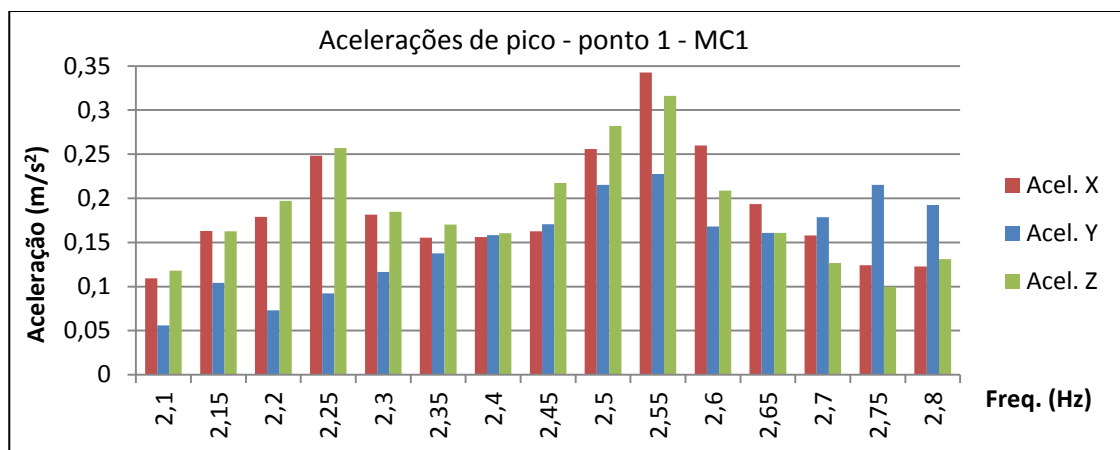


Figura 7.23 – Acelerações de pico no ponto 1 – MC1

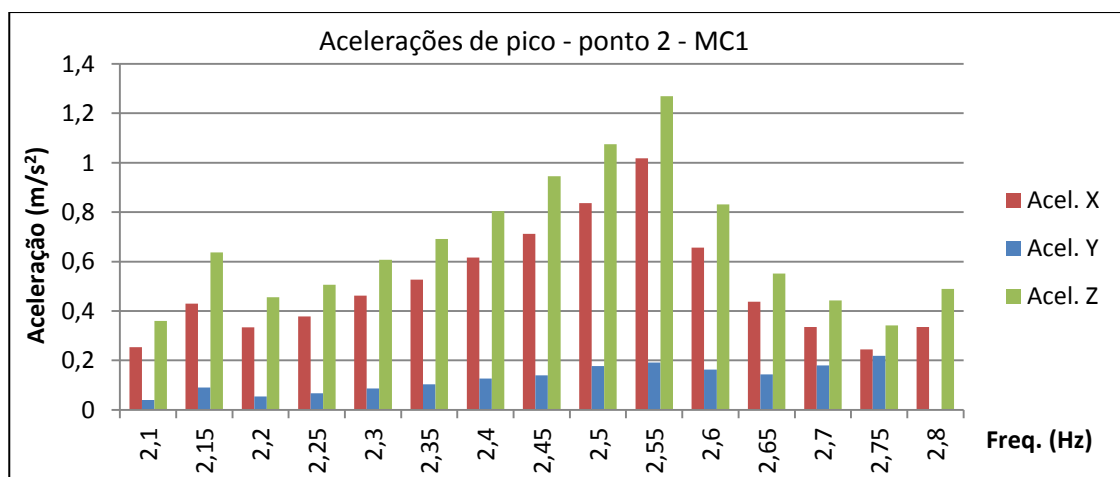


Figura 7.24 – Acelerações de pico no ponto 2 – MC1

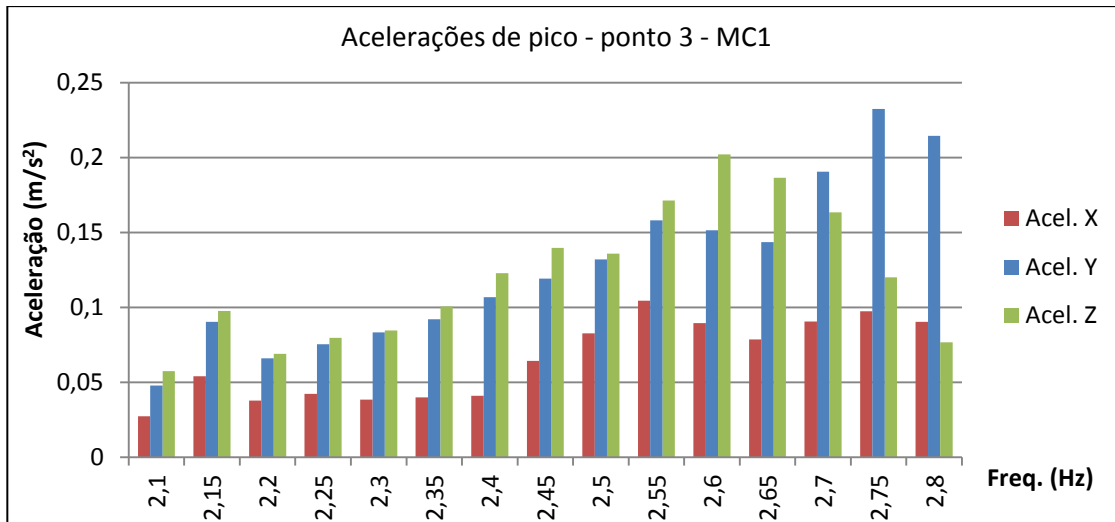


Figura 7.25 – Acelerações de pico no ponto 3 – MC1

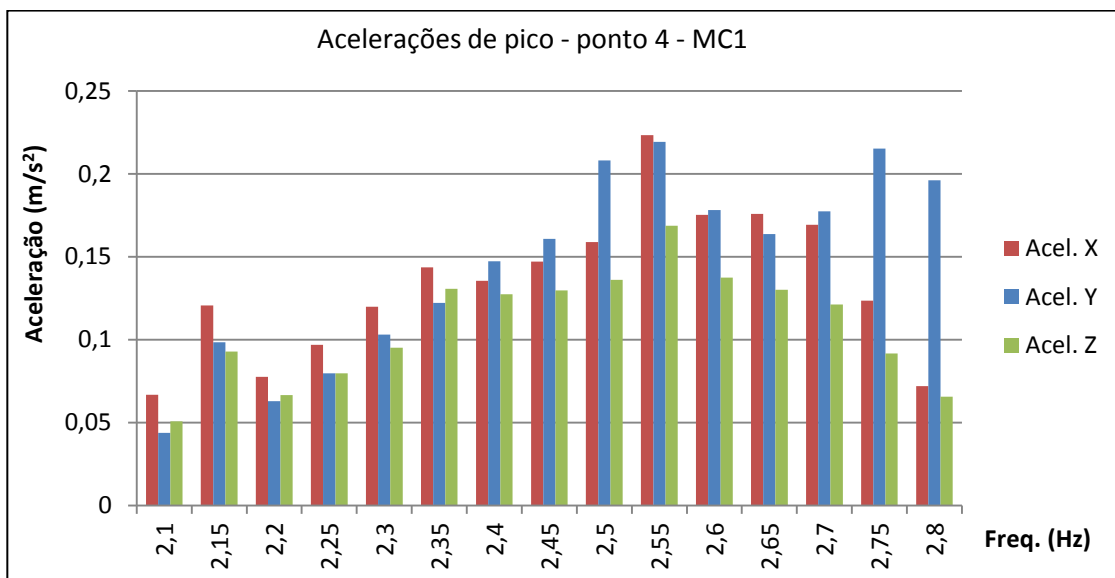


Figura 7.26 – Acelerações de pico no ponto 4 – MC1

A partir da observação das figuras anteriores pode ser verificado que a pior condição de carregamento para os eixos “X” e “Z” em todos os pontos analisados ocorre para o carregamento com frequência de excitação igual a 2,55Hz. Os espectros de acelerações obtidos para o segundo ponto e frequência de 2,55Hz são apresentados nas figuras 7.27 e 7.28 e mostram a contribuição para os deslocamentos nestes eixos devido aos modos cinco a sete, cujas frequências naturais encontram-se muito perto do segundo harmônico do carregamento.

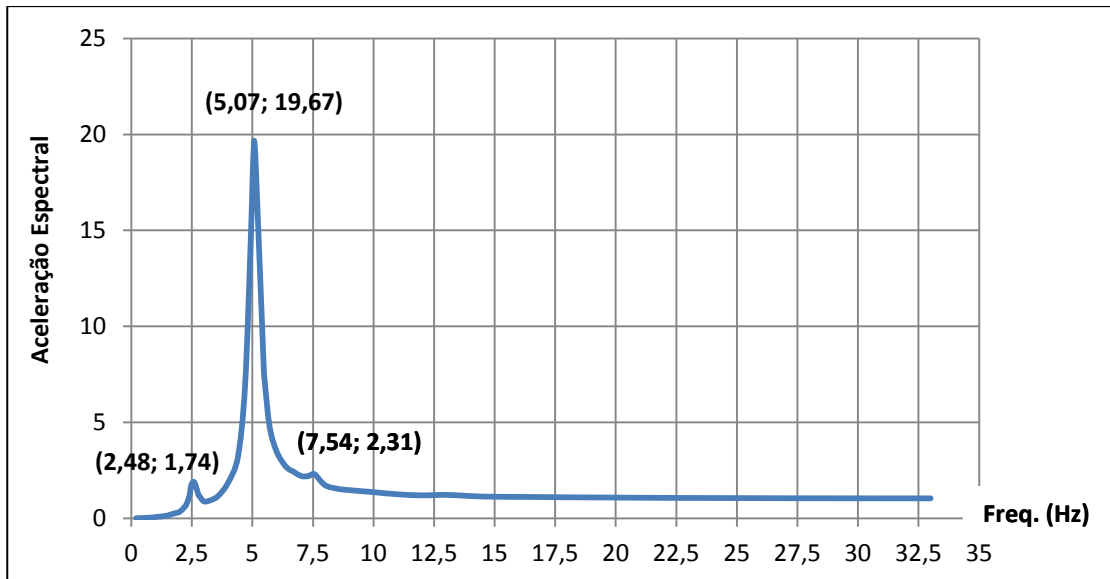


Figura 7.27 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC1

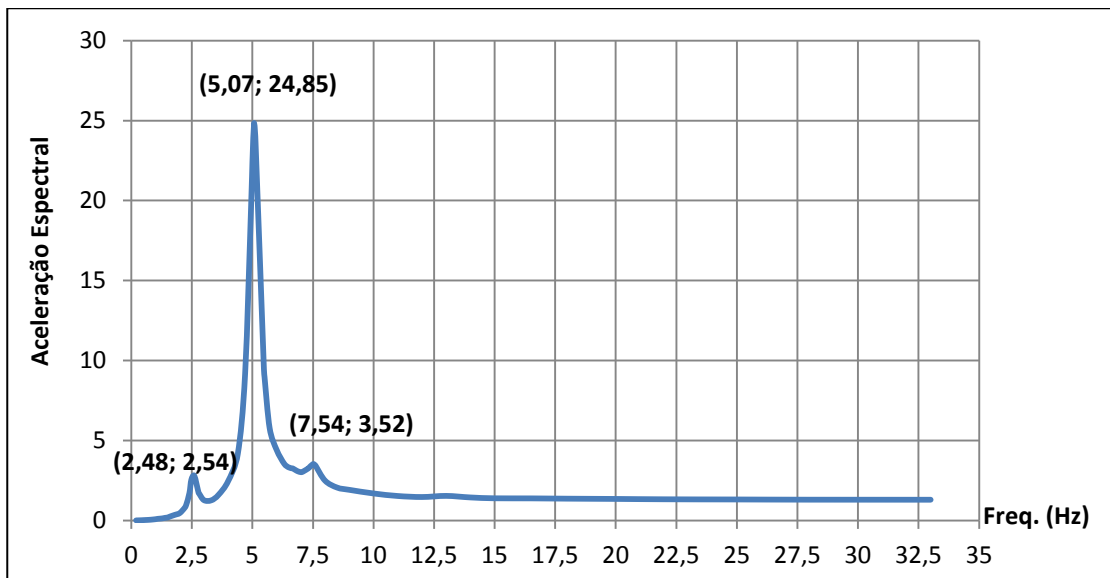


Figura 7.28 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC1

Com relação ao eixo “Y” se observa uma maior resposta do sistema para frequências de excitação maiores que 2,45Hz, sendo que o pior caso ocorre para a frequência igual a 2,75Hz. Isso decorre da contribuição dos modos três e quatro, que possuem deslocamentos no sentido tangencial e frequências naturais próximas à faixa de carregamento citada. Além disso, verifica-se também uma pequena contribuição do quinto modo, que também possui componente tangencial de deslocamento e frequência natural passível de ser excitado pelo segundo harmônico do carregamento. O espectro de acelerações obtido para o terceiro ponto de análise e frequência de carregamento igual a 2,75Hz é apresentado na figura 7.29, corroborando a análise feita.

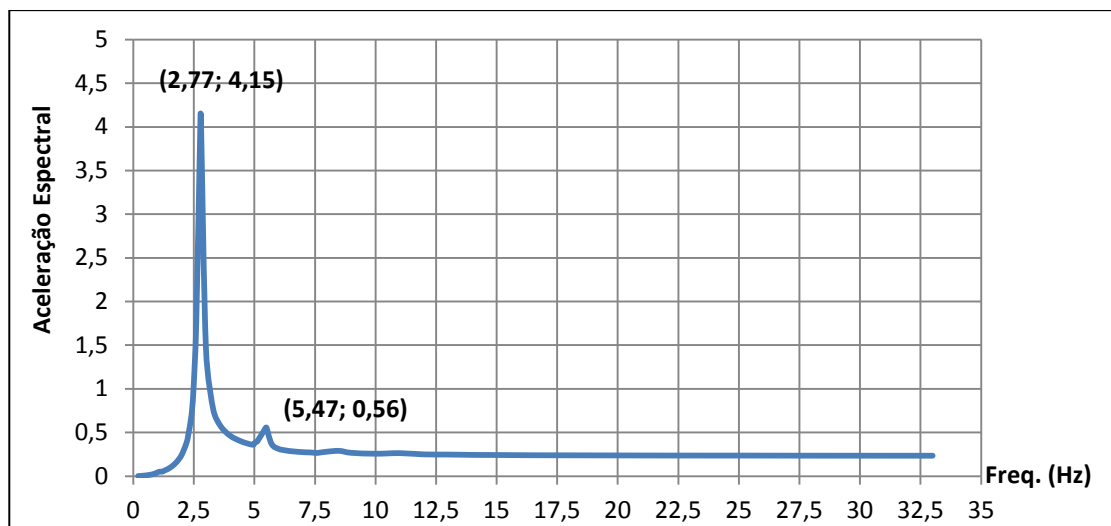


Figura 7.29 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 3 – MC1

7.4.2. Acelerações obtidas para o MC2

A variação do carregamento utilizado neste estudo em relação ao realizado no item anterior ocorre apenas na disposição dos torcedores na arquibancada, sendo também utilizadas as 15 diferentes frequências de saltos do público. Na situação aqui analisada a torcida é alocada apenas nos dois vãos extremos das arquibancadas, conforme explicado no item 7.3. Os pontos de leitura das acelerações são os mesmos utilizados no item anterior e foram escolhidos em função dos maiores deslocamentos obtidos na análise modal. A disposição da torcida e os pontos de leitura adotados podem ser verificados na figura 7.30. Os resultados em termos de acelerações de pico obtidos para o segundo modelo de cálculo são apresentados nas figuras 7.31 a 7.34.

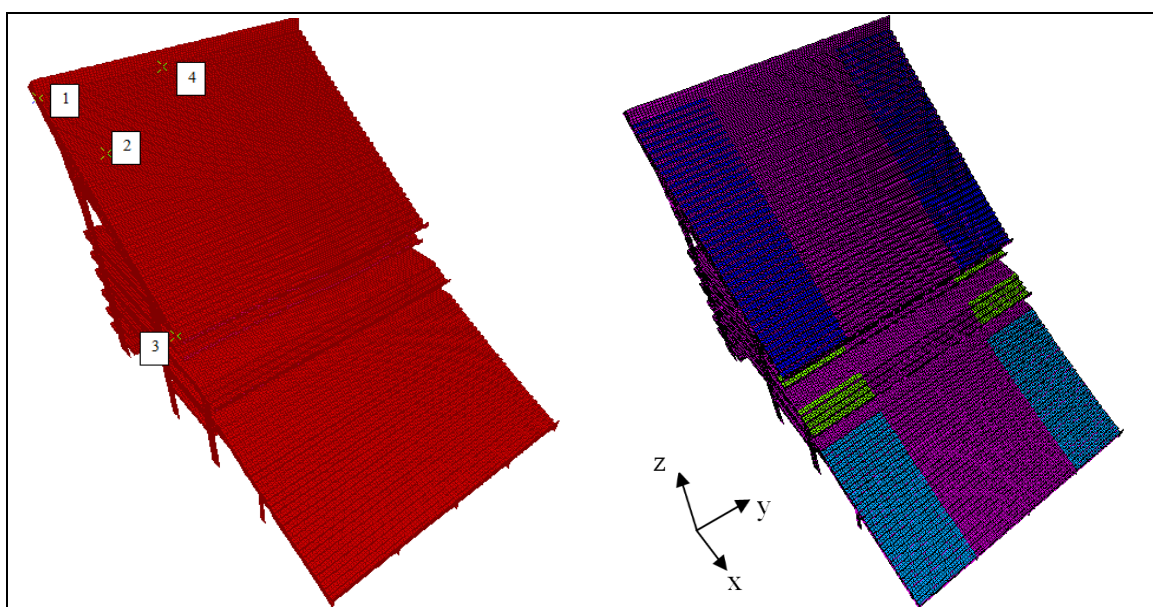


Figura 7.30 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC2

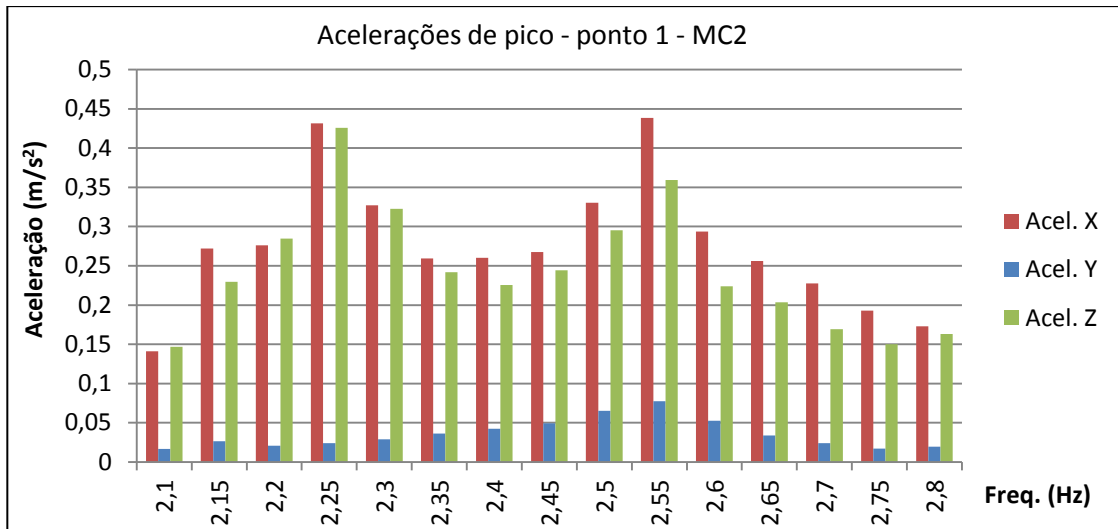


Figura 7.31 – Acerações de pico no ponto 1 – MC2

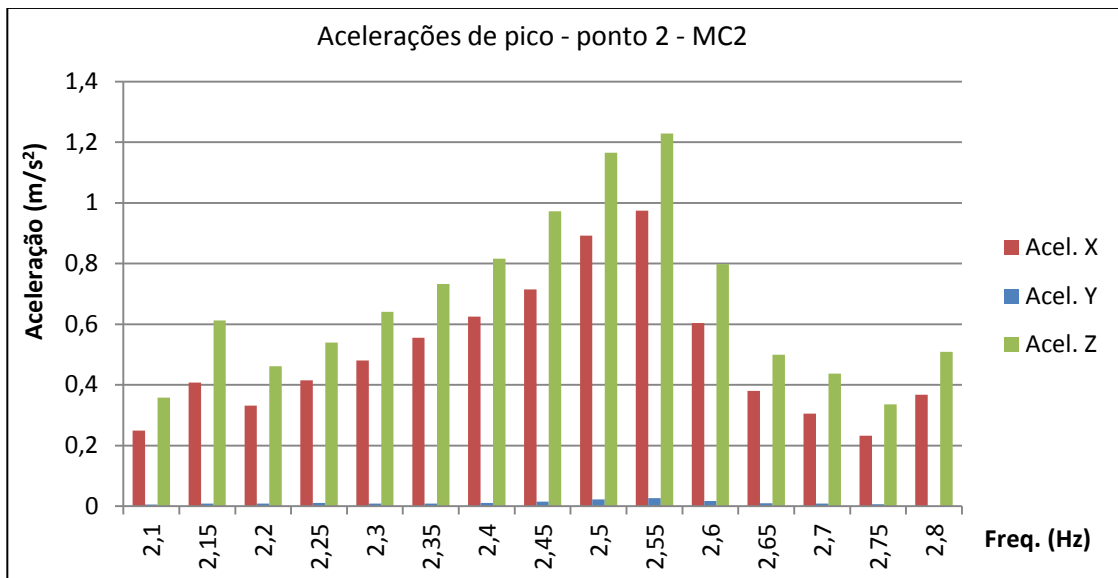


Figura 7.32 – Acerações de pico no ponto 2 – MC2

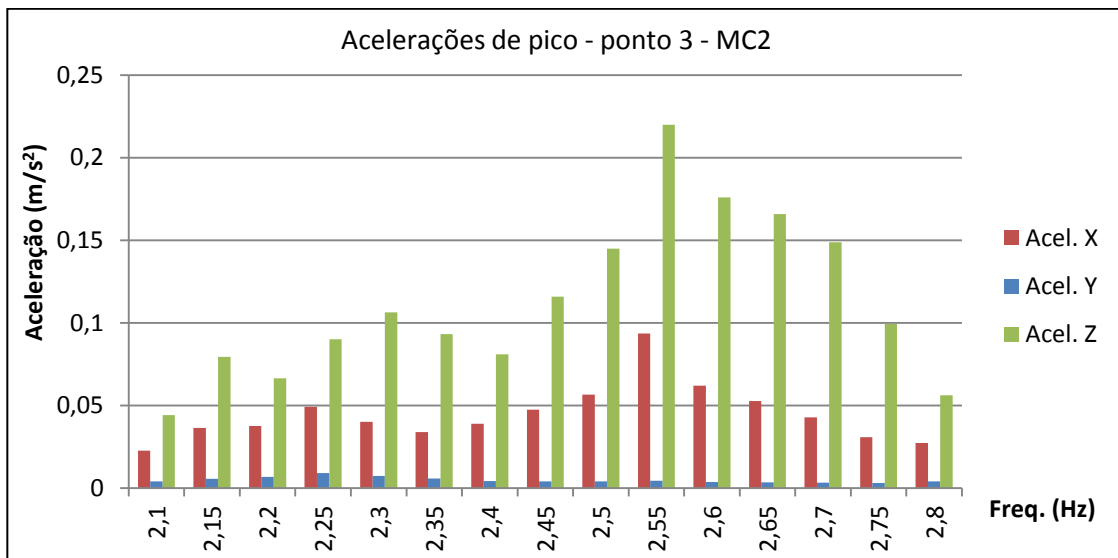


Figura 7.33 – Acerações de pico no ponto 3 – MC2

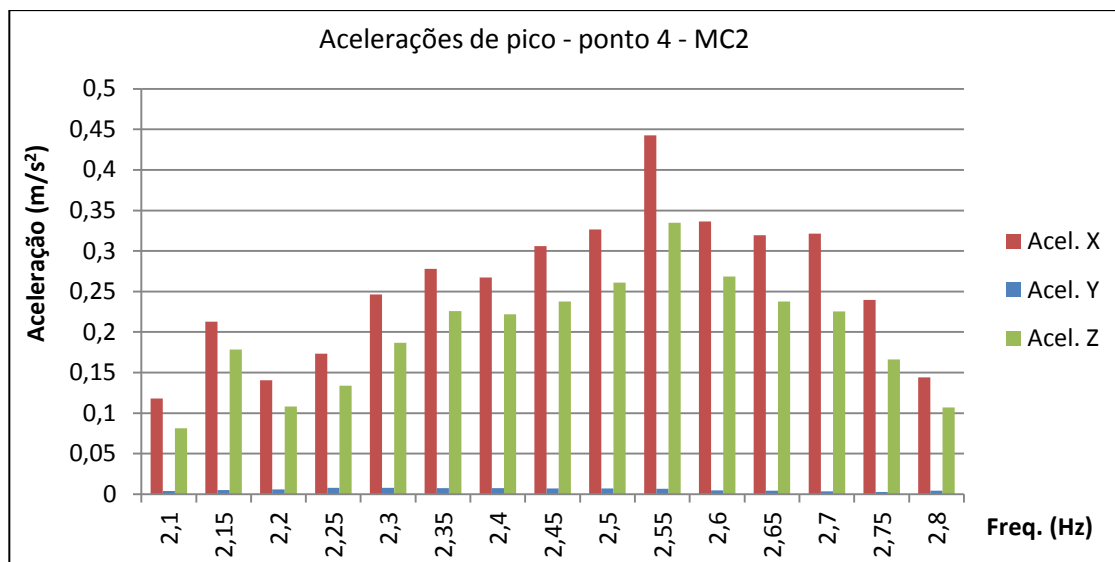


Figura 7.34 – Acelerações de pico no ponto 4 – MC2

Também neste modelo de cálculo, o carregamento que acarreta nas maiores acelerações nos pontos estudados para os eixos “X” e “Z” ocorre para a frequência de excitação igual a 2,55Hz, à exceção das acelerações verticais no primeiro ponto, onde o valor máximo ocorre para a frequência de 2,25Hz. De toda forma, o carregamento à frequência de 2,55Hz é o que ocasiona os maiores índices de aceleração, situação que ocorre no segundo ponto analisado. Os espectros de acelerações obtidos para o segundo ponto são apresentados nas figuras 7.35 e 7.36 e mostram a contribuição para os deslocamentos nestes eixos devido ao quinto, sexto e sétimo modos, que possuem componentes de deslocamento vertical e radial e frequências naturais muito próximas do segundo harmônico do carregamento.

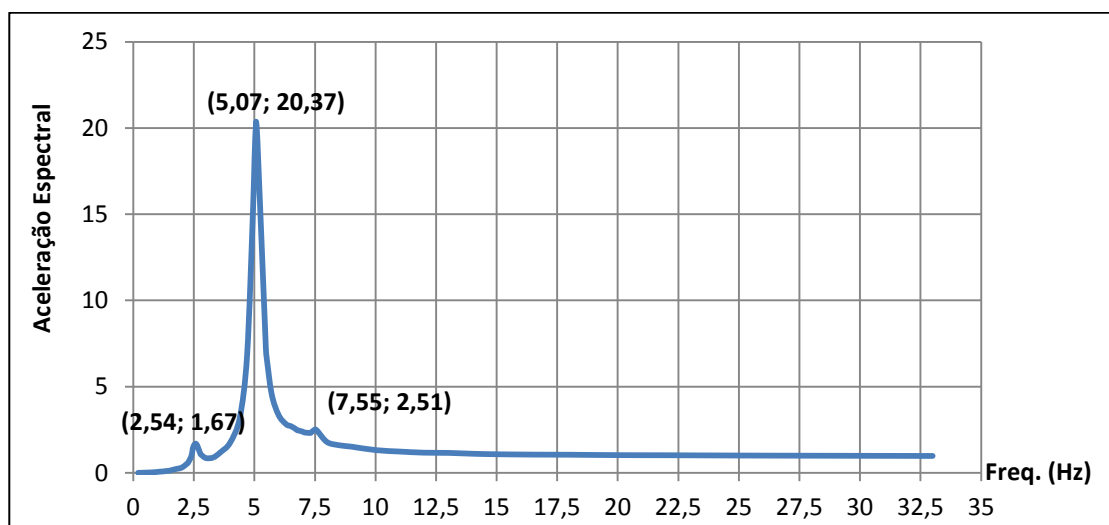


Figura 7.35 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC2

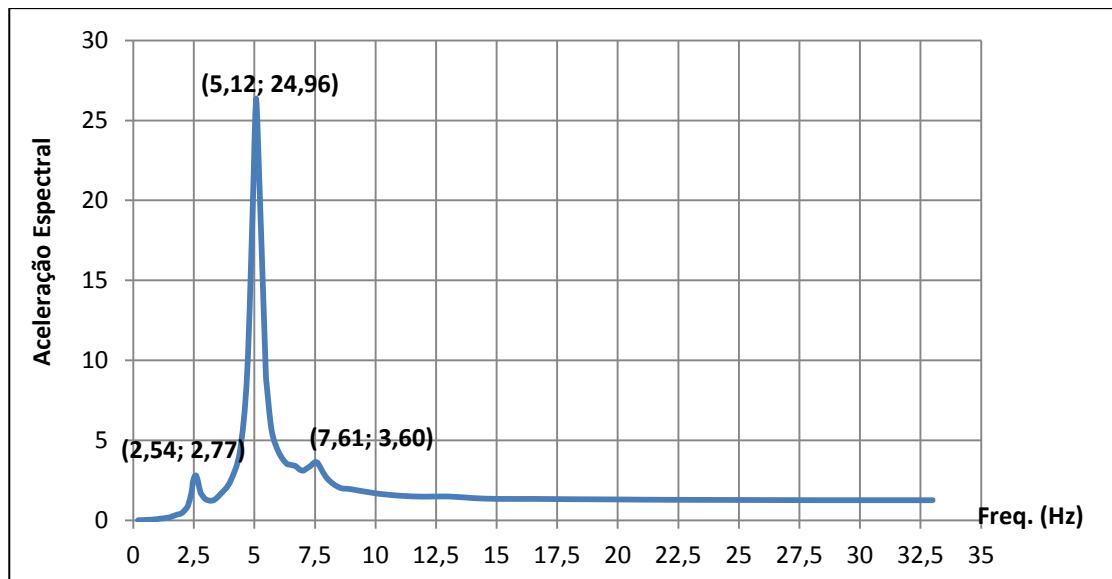


Figura 7.36 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC2

Com relação ao eixo “Y” não se observam respostas da mesma magnitude das obtidas pelos demais eixos, sendo que a maior delas ocorre no primeiro ponto e frequência de excitação igual a 2,55Hz. O espectro de acelerações para esse ponto e frequência é mostrado na figura 7.37 e explica o resultado obtido. Como pode ser observado, o modo cinco, que tem frequência natural próxima ao segundo harmônico do carregamento é o que mais colabora para o deslocamento, seguido pelo décimo oitavo modo, que tem frequência natural próxima ao terceiro harmônico da carga, não sendo verificadas grandes contribuições do terceiro e quarto modos. Essa situação já era esperada, tendo em vista que neste modelo não ocorre excentricidade na aplicação do carregamento, situação que poderia gerar algum deslocamento tangencial, como ocorreu no estudo anterior.

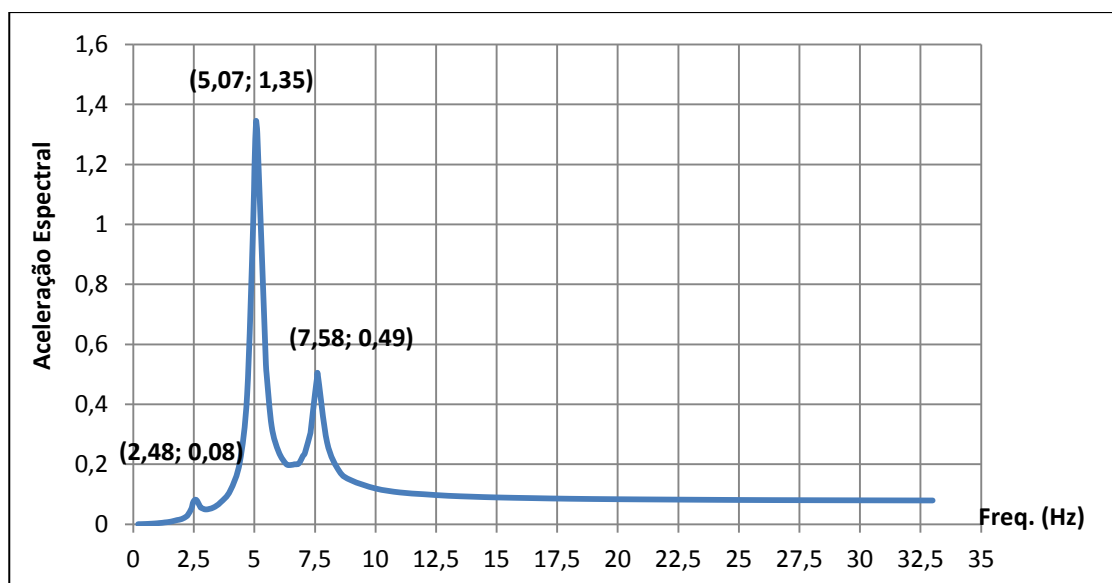


Figura 7.37 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 1 – MC2

7.4.3. Acelerações obtidas para o MC3

Para o terceiro estudo de carregamento também são aplicadas as 15 diferentes frequências de saltos do público, porém, é considerado que a torcida se encontra apenas nos dois primeiros vãos da arquibancada, utilizando-se assim de 50% da área disponível ao público. Os pontos de leitura das acelerações e a disposição da torcida podem ser verificados na figura 7.38, ao passo que os resultados obtidos para o terceiro modelo de cálculo são apresentados nas figuras 7.39 a 7.42.

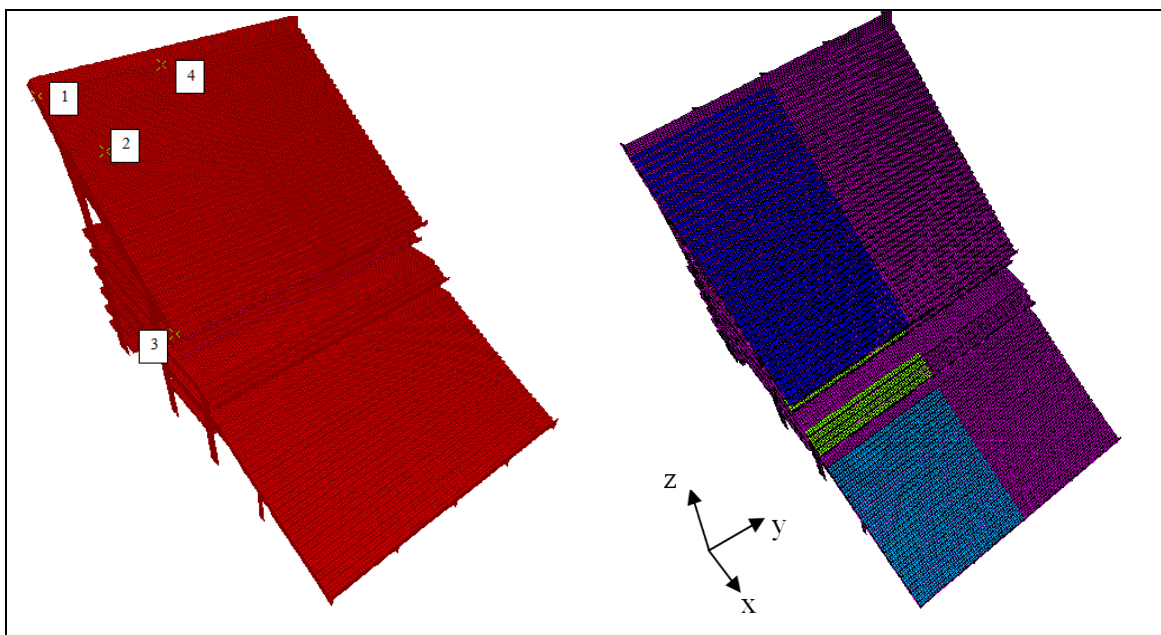


Figura 7.38 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC3

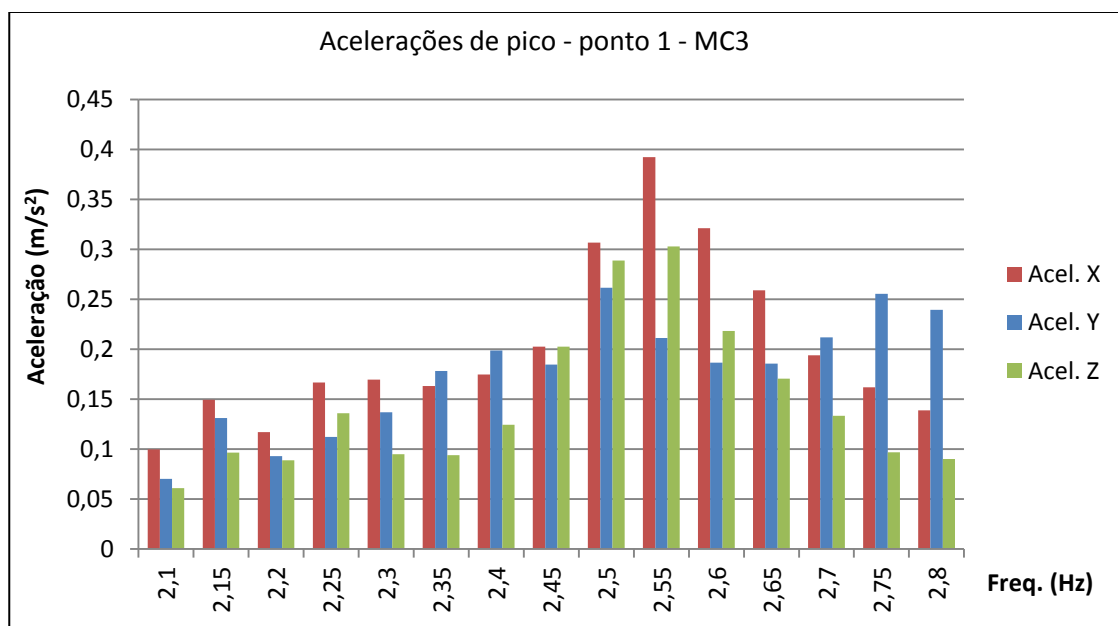


Figura 7.39 – Acelerações de pico no ponto 1 – MC3

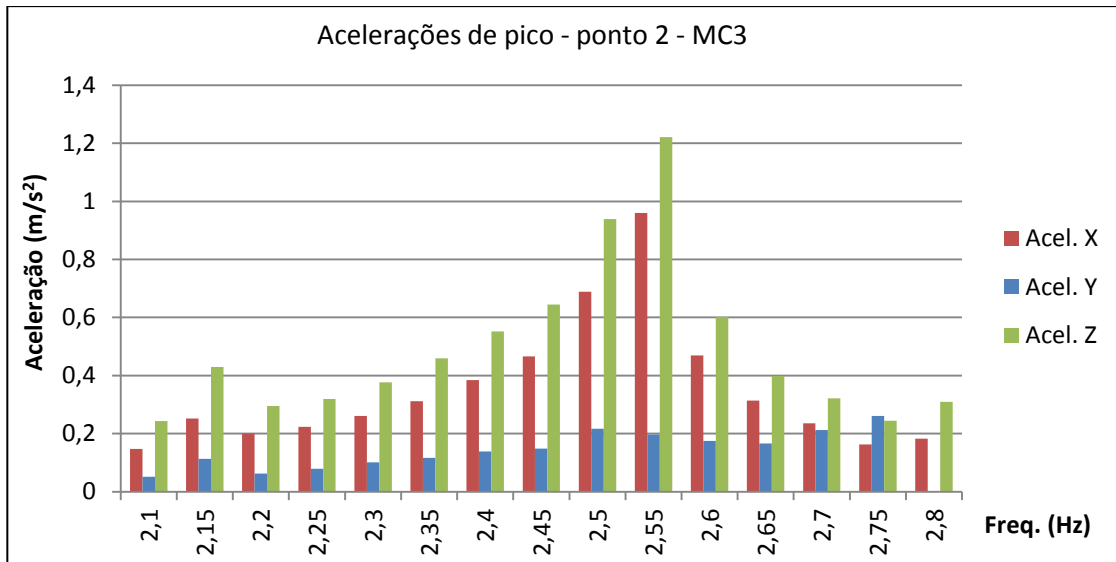


Figura 7.40 – Acerações de pico no ponto 2 – MC3

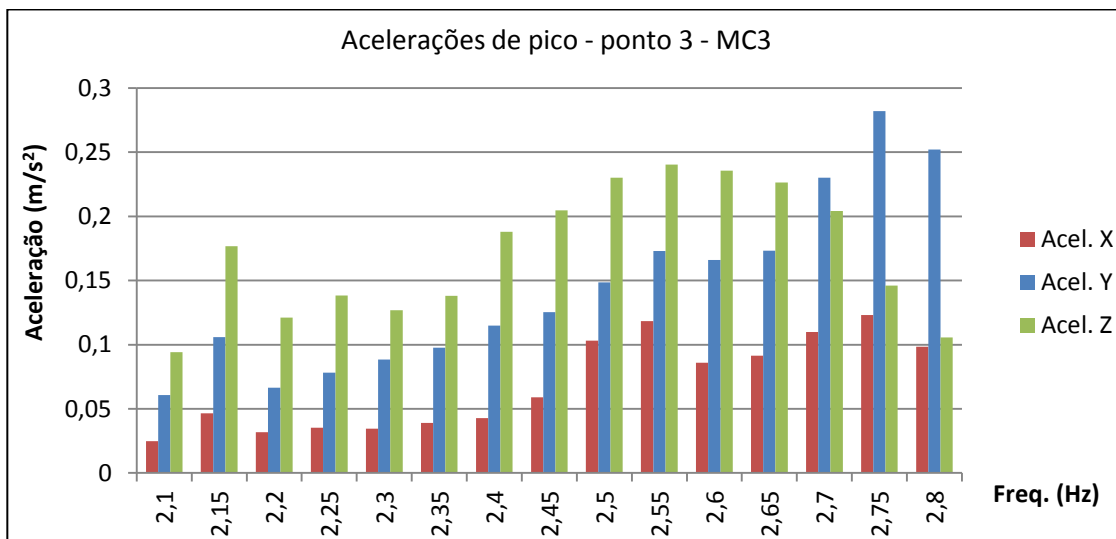


Figura 7.41 – Acerações de pico no ponto 3 – MC3

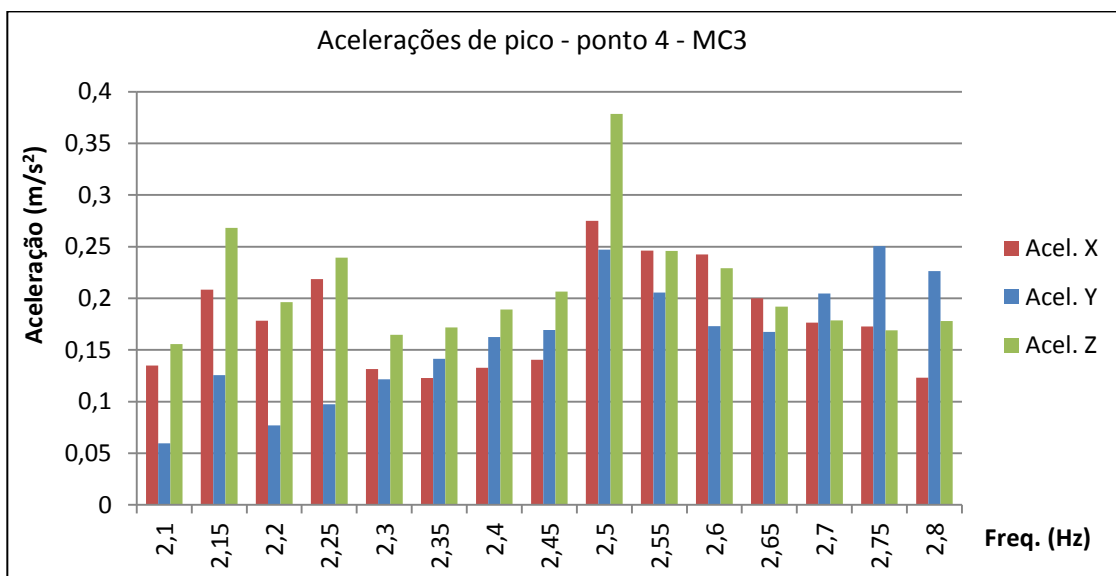


Figura 7.42 – Acerações de pico no ponto 4 – MC3

Os resultados obtidos para esse modelo de cálculo mostram que em alguns casos as acelerações no sentido tangencial podem superar as existentes nos outros eixos. Com relação às existentes no sentido vertical e no radial, os maiores índices ocorrem para o carregamento à frequência de excitação igual à 2,55Hz para os três primeiros pontos e à frequência de 2,50Hz para o quarto ponto estudado. Também nesse modelo de cálculo o pior resultado ocorre para o segundo ponto analisado, à frequência de carga de 2,55Hz. Os espectros de acelerações obtidos para este ponto e frequência são apresentados nas figuras 7.43 e 7.44 e mostram a contribuição para os deslocamentos nestes eixos devido aos modos cinco, seis e sete, que possuem componentes de deslocamento vertical e radial e frequências naturais muito próximas ao segundo harmônico do carregamento.

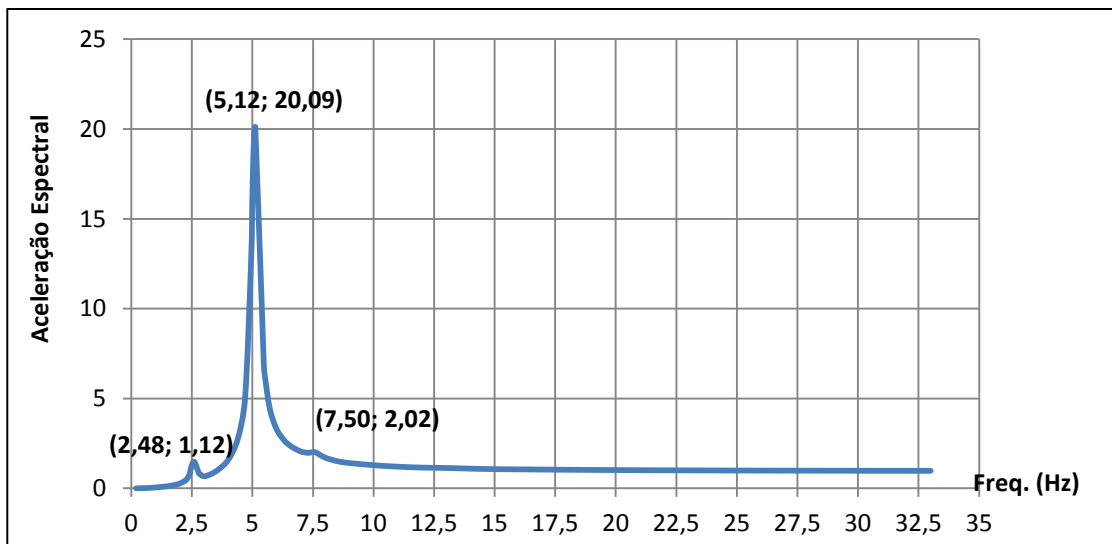


Figura 7.43 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC3

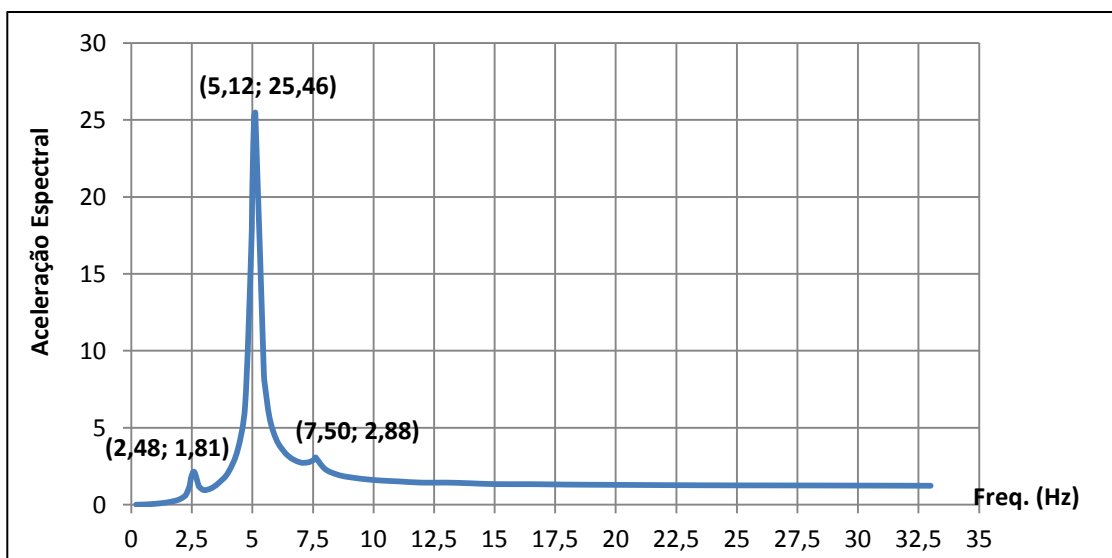


Figura 7.44 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC3

Com relação ao eixo “Y” podem ser observadas respostas superiores às obtidas para os demais eixos no terceiro ponto estudado, sendo que a pior situação ocorre para a frequência de carregamento igual a 2,75Hz. O espectro de acelerações para esse ponto e frequência de excitação é mostrado na figura 7.45 e explica o resultado obtido. Como pode ser observado, o terceiro modo de vibração com frequência natural igual a 2,78Hz está quase em ressonância com o carregamento e colabora fortemente para a os deslocamentos tangenciais da arquibancada. Apesar de não ter sido incluída componente horizontal de carga nesse modelo, as acelerações tangenciais obtidas podem ser explicadas pela excentricidade de aplicação da carga vertical, assim como ocorreu para o primeiro modelo estudado.

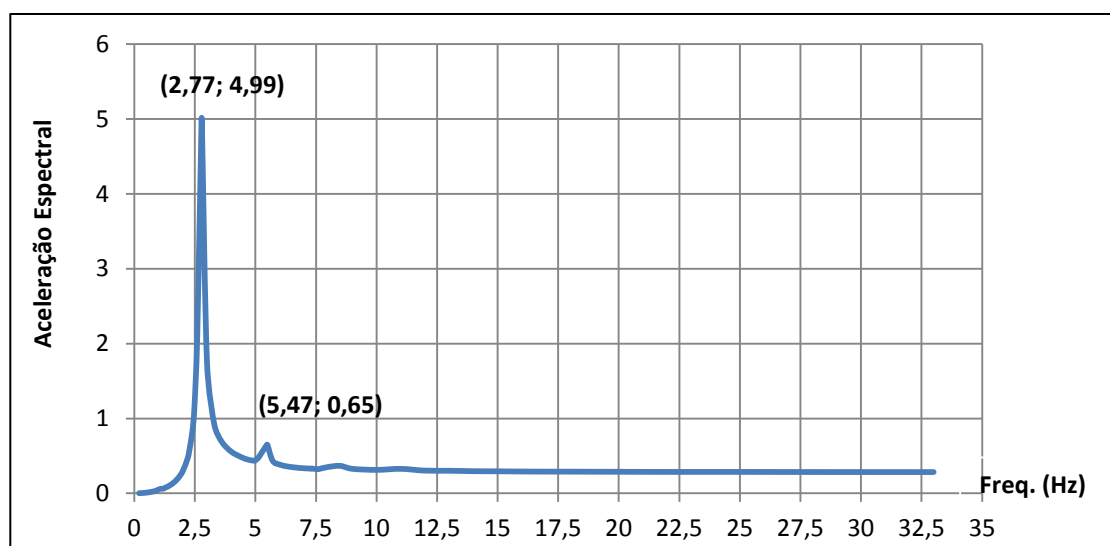


Figura 7.45 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 3 – MC3

7.4.4. Acelerações obtidas para o MC4

Assim como nos demais casos estudados, o quarto modelo de estudo também conta com a aplicação de 15 diferentes frequências de excitação no sistema, porém, neste modelo é considerado que a torcida está disposta a apenas nos níveis intermediário e superior da estrutura. Os pontos de leitura das acelerações são os mesmos adotados nos estudos anteriores e podem ser verificados na figura 7.46, imagem que também mostra a disposição do público na arquibancada. Os resultados em termos de aceleração de pico obtidos para o quarto modelo de cálculo são apresentados nas figuras 7.47 a 7.50.

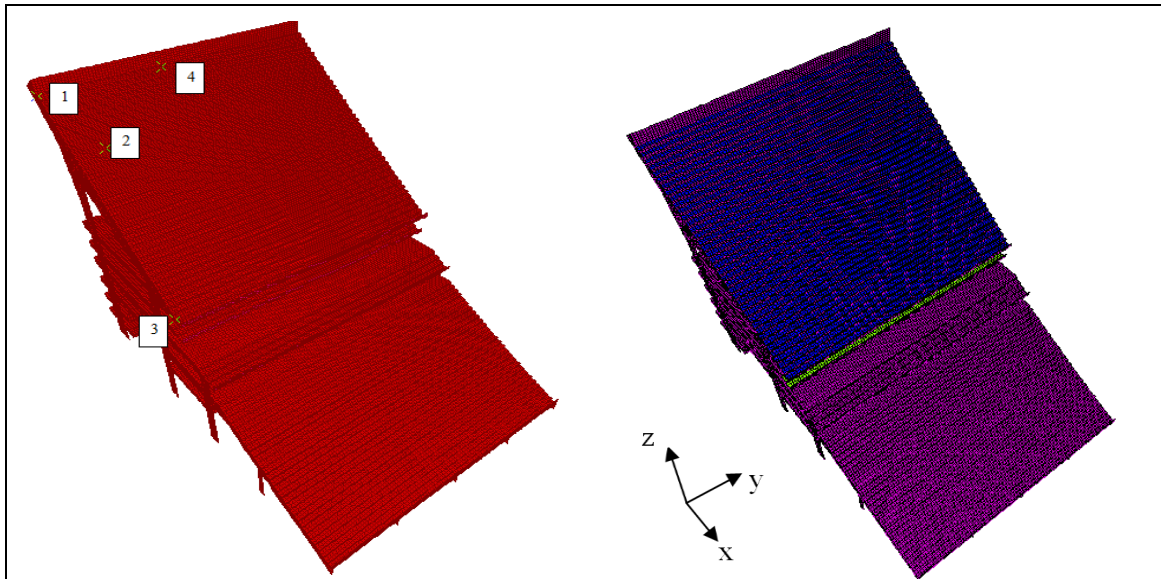


Figura 7.46 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC4

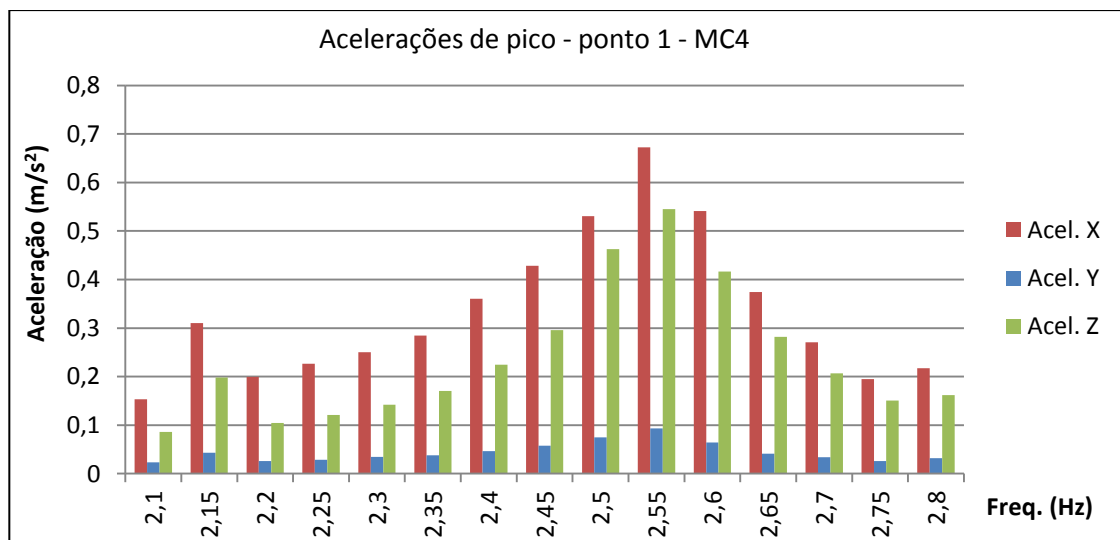


Figura 7.47 – Acelerações de pico no ponto 1 – MC4

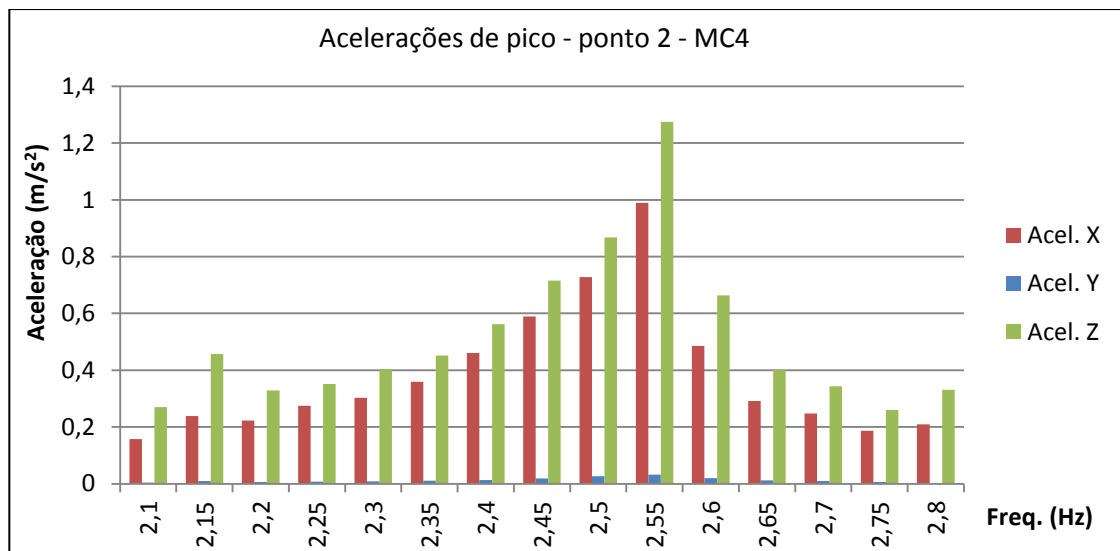


Figura 7.48 – Acelerações de pico no ponto 2 – MC4

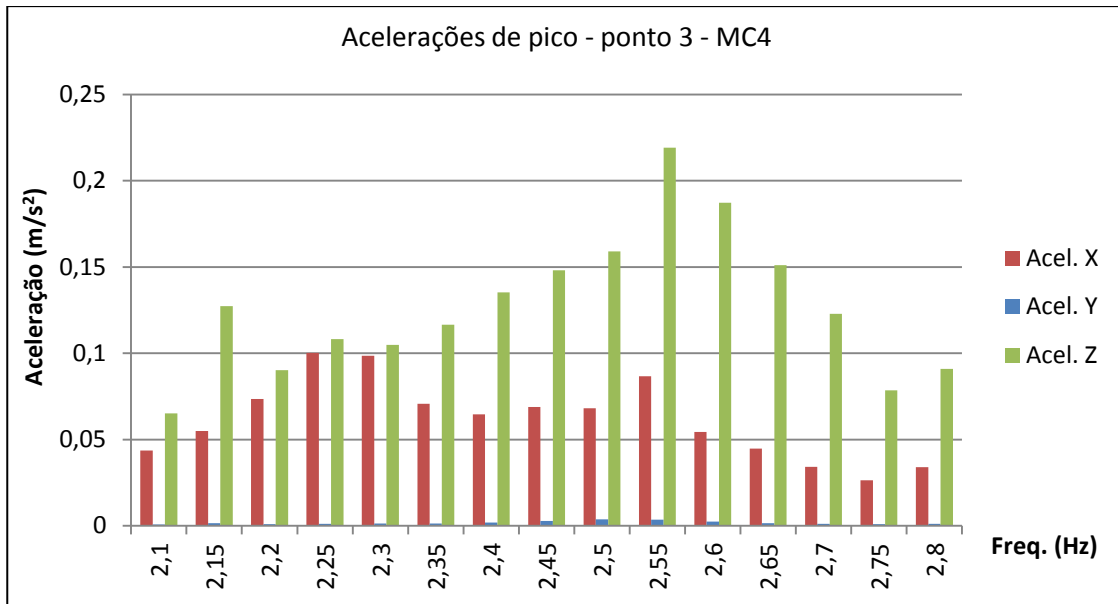


Figura 7.49 – Acelerações de pico no ponto 3 – MC4

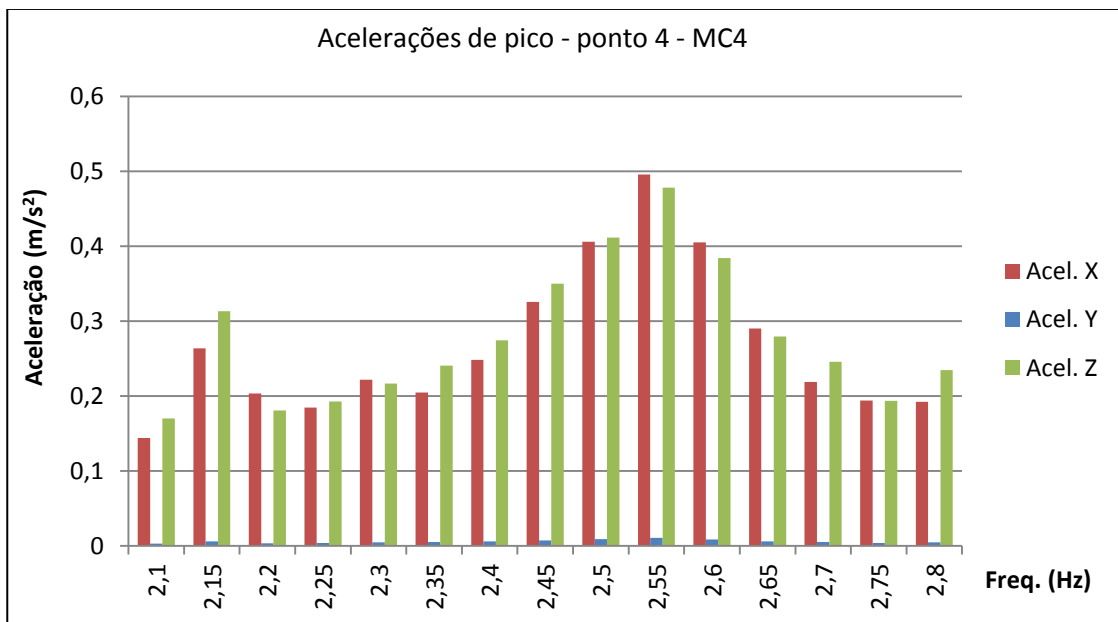


Figura 7.50 – Acelerações de pico no ponto 4 – MC4

Para esse estudo as piores situações de conforto nos eixos vertical e radial ocorrem para o carregamento à frequência de excitação de 2,55Hz, à exceção da aceleração em “X” para o terceiro ponto, que ocorre à frequência igual a 2,25Hz. No entanto, o pior resultado obtido também acontece para o segundo ponto de análise à frequência de 2,55Hz, assim como nos demais casos apresentados até então. Os espectros de acelerações obtidos para este ponto e frequência são apresentados nas figuras 7.51 e 7.52 e mostram a contribuição para os deslocamentos nestes eixos devido aos modos cinco a sete, que possuem componentes de deslocamento vertical e radial e frequências naturais muito próximas ao segundo harmônico do carregamento.

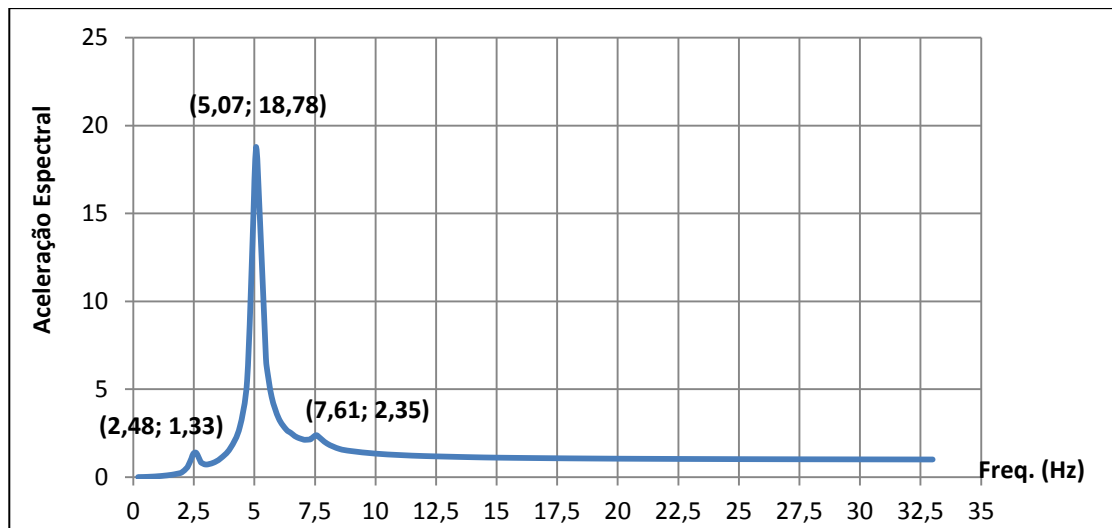


Figura 7.51 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC4

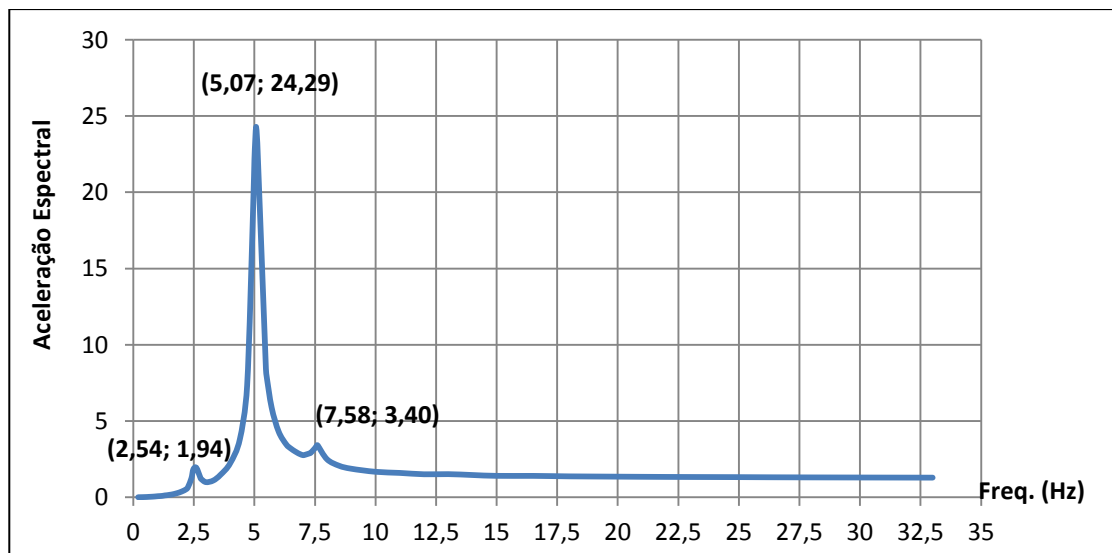


Figura 7.52 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC4

Com relação ao eixo “Y” podem ser observadas respostas muito inferiores às obtidas para os demais eixos, sendo que a pior situação ocorre para o primeiro ponto, à frequência de carregamento igual a 2,55Hz, em situação análoga à ocorrida para o segundo caso de carregamento estudado. O espectro de acelerações para esse ponto e frequência de excitação é mostrado na figura 7.53 e explica o resultado obtido. Como pode ser observado, o quinto modo, que tem frequência natural próxima ao segundo harmônico do carregamento é o que mais colabora para o deslocamento, seguido do décimo oitavo modo, que possui frequência natural próxima ao terceiro harmônico do carregamento, não sendo verificadas grandes contribuições do terceiro e quarto modos. Essa situação já era esperada, face à não existência de excentricidade no carregamento.

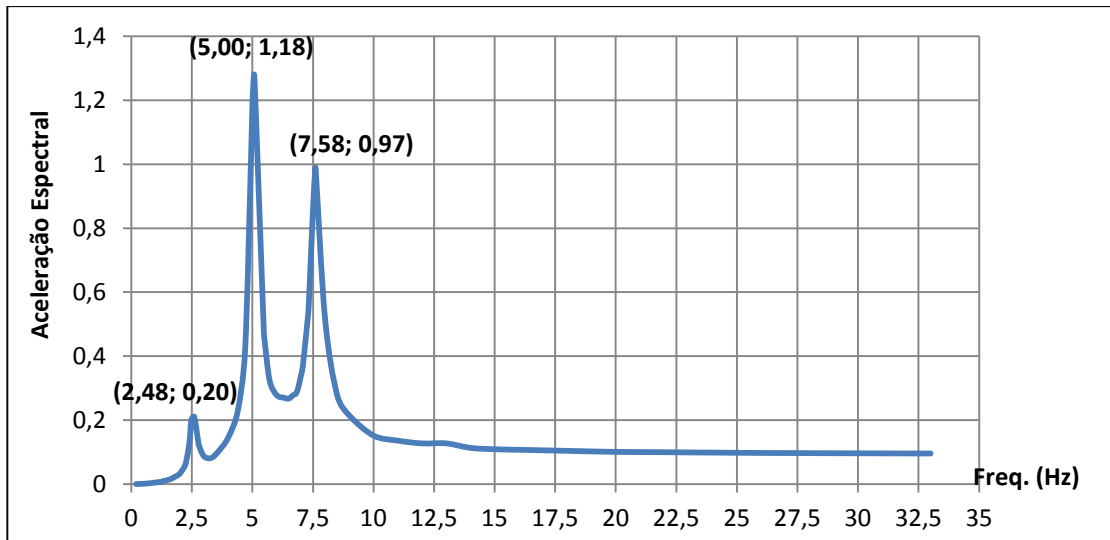


Figura 7.53 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 1 – MC4

7.4.5. Acelerações obtidas para o MC5

O quinto modelo de carregamento considera que as arquibancadas estão totalmente tomadas pelos torcedores, além da aplicação das mesmas 15 frequências de carregamento adotadas nos modelos anteriores. Os pontos de leitura das acelerações são os mesmos e levam em conta os maiores deslocamentos obtidos na análise modal. A figura 7.54 apresenta os pontos de leitura utilizados e a disposição do público na arquibancada, enquanto que os resultados em termos de aceleração de pico obtidos para este modelo de cálculo são apresentados nas figuras 7.55 a 7.58.

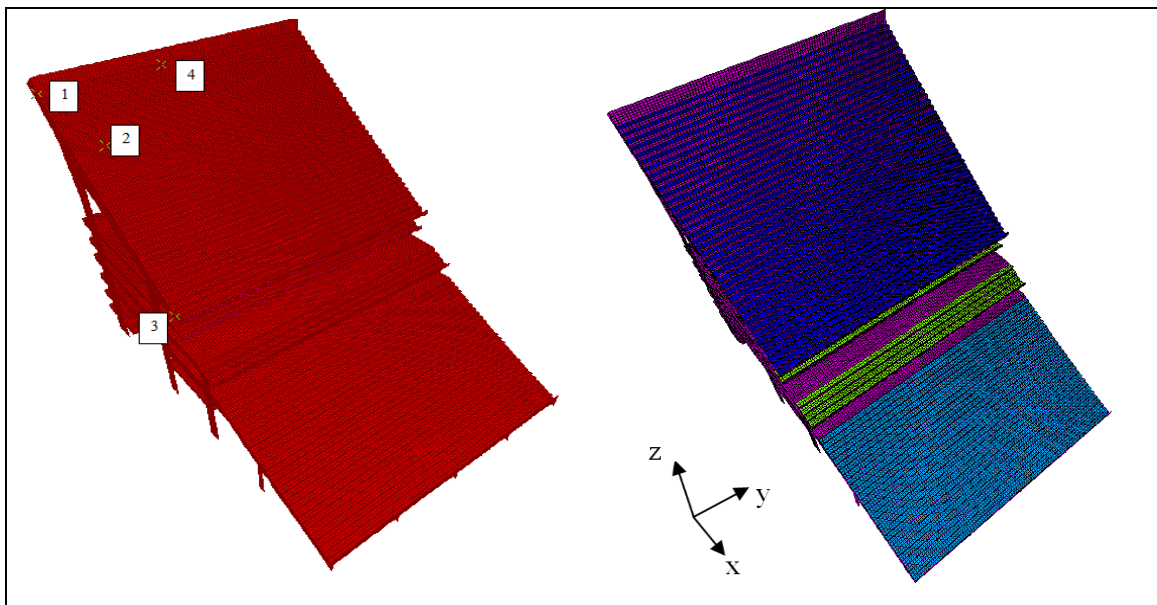


Figura 7.54 – Pontos de leitura das acelerações e disposição da torcida – MC5

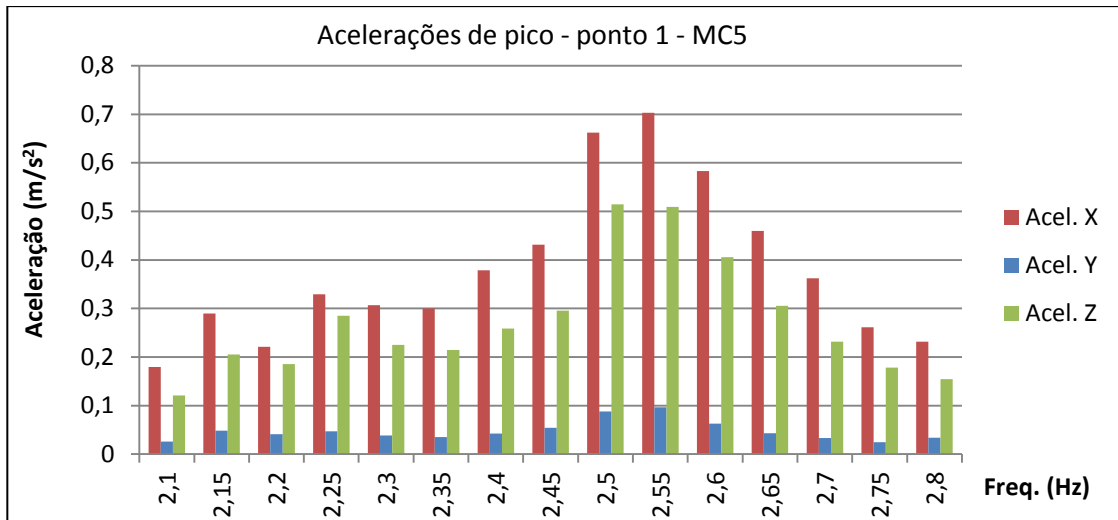


Figura 7.55 – Acerações de pico no ponto 1 – MC5

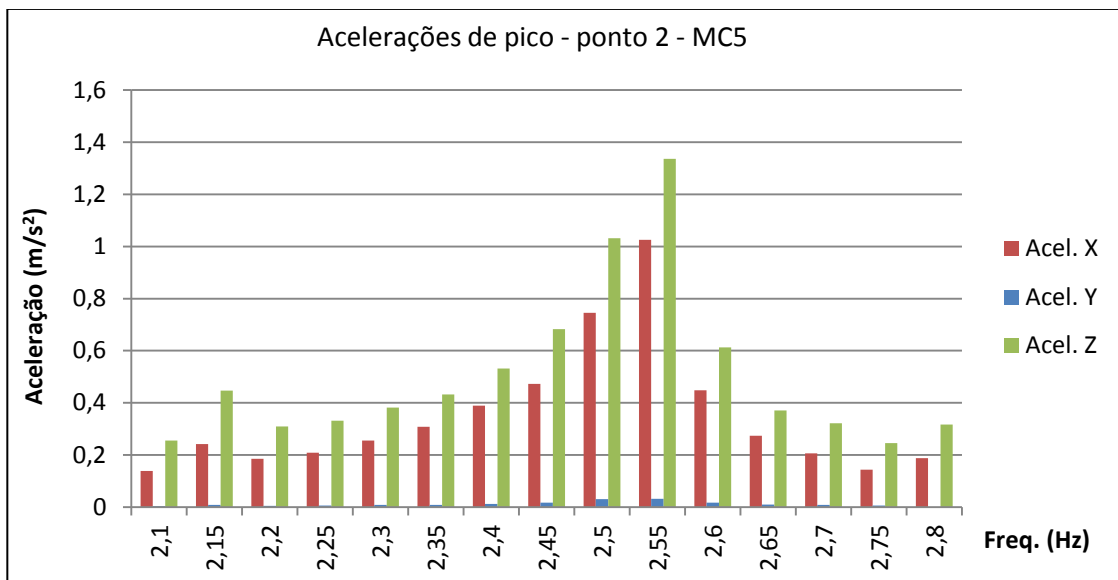


Figura 7.56 – Acerações de pico no ponto 2 – MC5

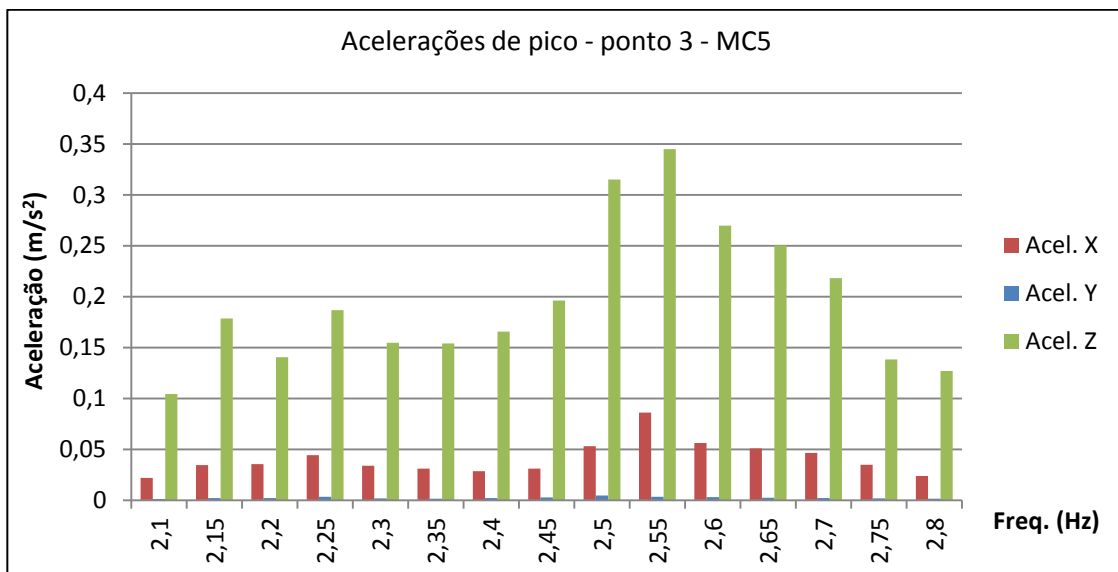


Figura 7.57 – Acerações de pico no ponto 3 – MC5

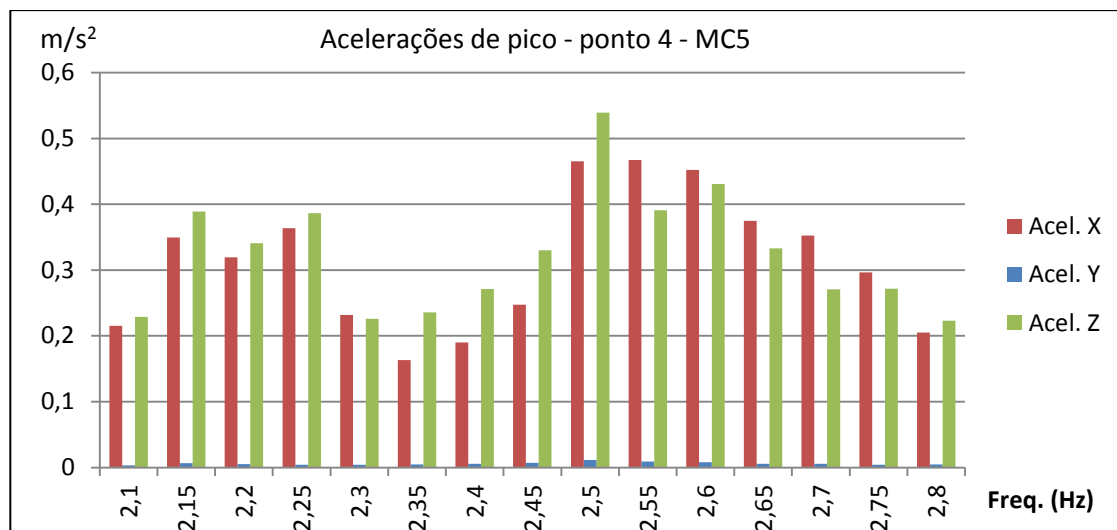


Figura 7.58 – Acelerações de pico no ponto 4 – MC5

Para este modelo de cálculo os piores resultados em termos de acelerações no sentido radial ocorrem para o carregamento à frequência de excitação de 2,55Hz nos quatro pontos estudados. Além disso, os três primeiros pontos também apresentam os piores índices para a frequência igual a 2,55Hz quando se observam as acelerações no sentido vertical, sendo que apenas o quarto ponto apresenta o maior valor para a frequência igual a 2,50Hz. Vale ressaltar que o segundo ponto é o que apresenta os maiores índices, acompanhando as respostas obtidas nos estudos anteriores e os resultados apresentados por Lima (2013) e Campista (2015) em suas pesquisas sobre essa arquibancada.

Os espectros de acelerações obtidos para o segundo ponto e frequência de excitação de 2,55Hz são apresentados nas figuras 7.59 e 7.60, mostrando a contribuição dos modos cinco a sete, que possuem componente de deslocamento em “X” e “Z” e autovalores próximos ao segundo harmônico do carregamento.

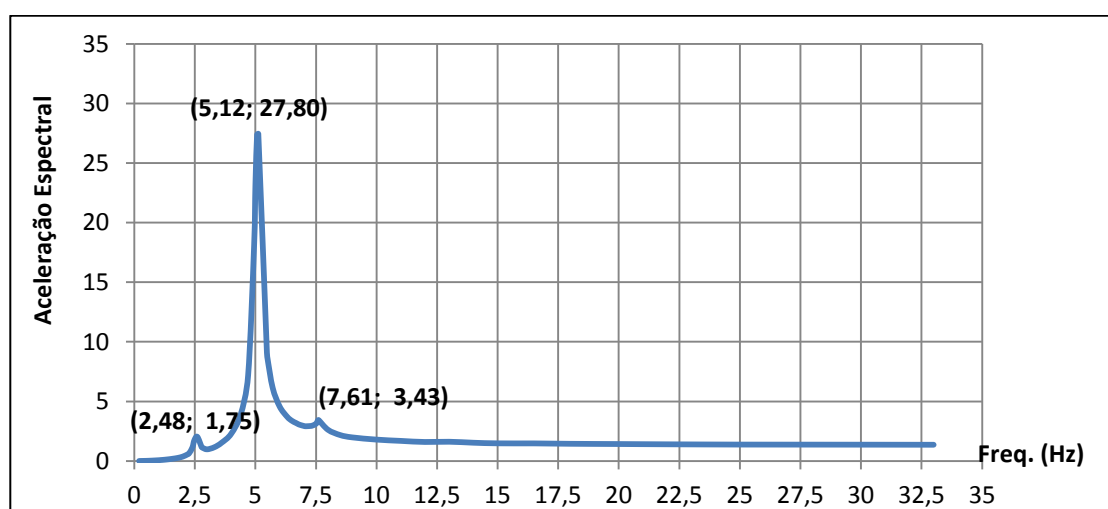


Figura 7.59 – Aceleração espectral em “X” – Ponto 2 – MC5

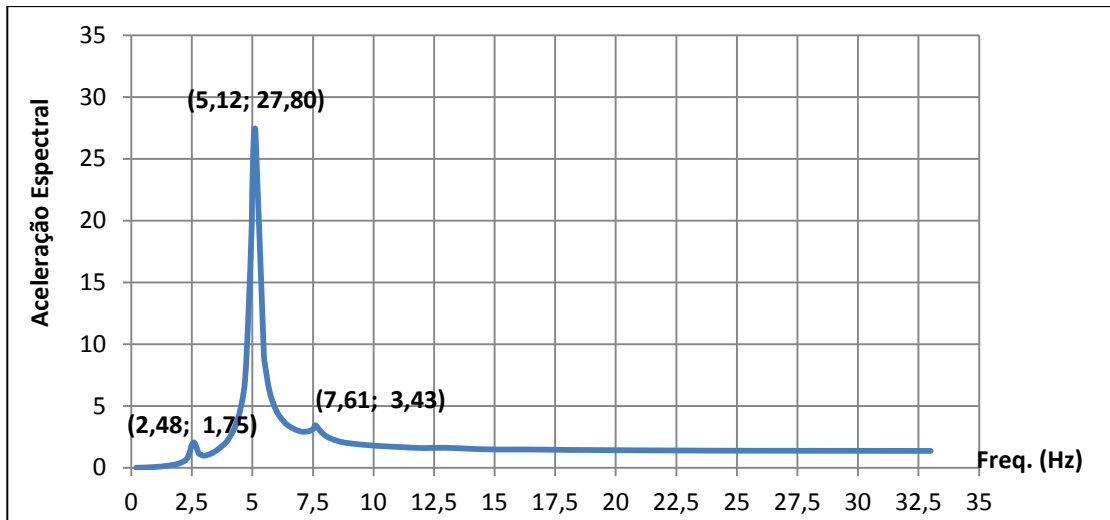


Figura 7.60 – Aceleração espectral em “Z” – Ponto 2 – MC5

Assim como no segundo e quarto estudos, onde não houve excentricidade de aplicação de cargas, pode ser observado que as respostas em termos de acelerações para o sentido tangencial não ocorrem na mesma ordem de grandeza das obtidas para os sentidos vertical e radial. Das figuras anteriores pode ser observado que a maior aceleração de pico ocorre para o primeiro ponto à frequência de 2,55Hz. O espectro de acelerações para esse ponto e frequência de excitação é mostrado na figura 7.61 e explica o resultado obtido. A situação é análoga à do quarto caso estudado, com o quinto modo, que tem frequência natural próxima do segundo harmônico do carregamento colaborando mais fortemente com a resposta, seguido do décimo oitavo modo, cuja frequência natural é próxima ao terceiro harmônico da carga. Não são verificadas grandes contribuições do terceiro e quarto modos, situação já esperada, face à não existência de excentricidade na aplicação das cargas.

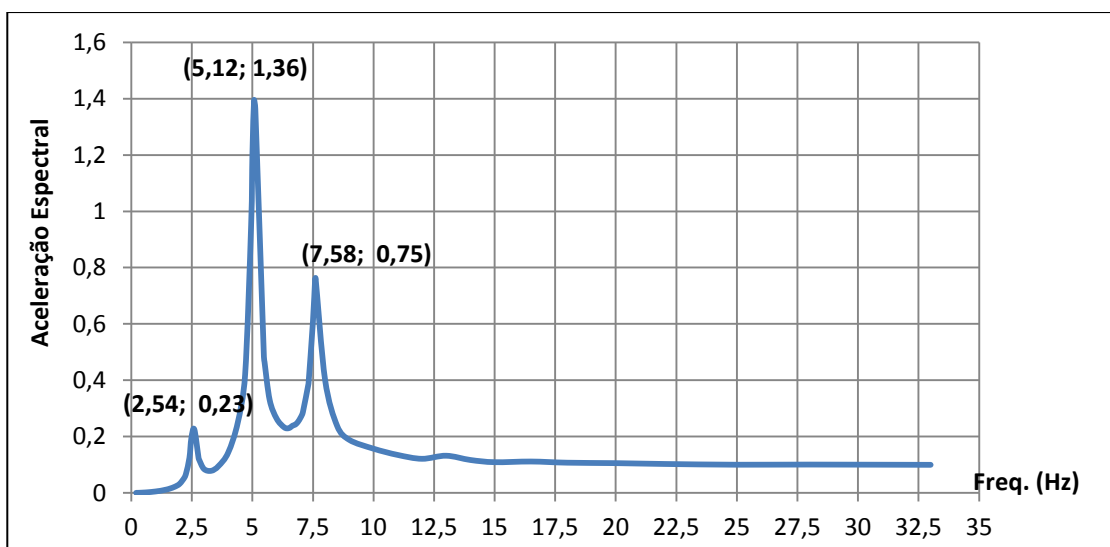


Figura 7.61 – Aceleração espectral em “Y” – Ponto 1 – MC5

7.4.6. Verificação das respostas dinâmicas quanto aos limites normativos

A verificação do nível de conforto aos usuários é fundamental para a determinação da necessidade de utilização de dispositivos que atenuem a vibração. Para a realização dessa tarefa são comparados os resultados obtidos com os limites apresentados no quarto capítulo deste trabalho.

Dos estudos anteriores são obtidas acelerações de cinco modelos com quinze frequências cada, quatro pontos de estudo e três eixos de leitura, totalizando 900 situações distintas. Tendo em vista o grande número de resultados, as análises de vibrações na estrutura são realizadas apenas para os piores resultados em cada ponto de caso estudado, levando em conta a frequência que os originou. As demais acelerações obtidas podem ser encontradas no anexo deste trabalho.

Tendo em vista que a parcela mais significativa de vibração ocorre no sentido vertical e que todos os normativos estudados estabelecem limites para essa componente, opta-se por iniciar a verificação em relação a esse sentido.

A averiguação da arquibancada com relação às acelerações de pico é realizada conforme Bachmann *et al* (1995), que consideram aceitáveis acelerações na faixa de 5% a 10% do valor da gravidade (0,5 a 1,0 m/s²) e conforme o CEB 209 (1991), cujos limites são apresentados na tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Limites de acelerações de pico segundo o CEB 209 (1991)

Descrição da vibração	Aceleração (m/s ²)
Apenas perceptível	0,034
Claramente perceptível	0,10
Desconfortável	0,55
Intolerável	1,80

Os piores resultados em termos de acelerações de pico obtidos para os modelos estudados podem ser verificados na tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Análise dos limites normativos para aceleração de pico na direção vertical

Modelo	Ponto	a_{pico} (m/s ²)	Frequência (Hz)	CEB 209 (1991)	Bachmann <i>et al</i> (1995)
MC1	1	0,316	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
	2	1,269	2,55	Desconfortável	Não Aceitável
	3	0,202	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
	4	0,169	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
MC2	1	0,426	2,25	Claramente perceptível	Aceitável
	2	1,229	2,55	Desconfortável	Não Aceitável
	3	0,220	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
	4	0,335	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
MC3	1	0,303	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
	2	1,222	2,55	Desconfortável	Não Aceitável
	3	0,240	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
	4	0,379	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
MC4	1	0,545	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
	2	1,275	2,55	Desconfortável	Não Aceitável
	3	0,219	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
	4	0,478	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
MC5	1	0,514	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
	2	1,336	2,55	Desconfortável	Não Aceitável
	3	0,345	2,55	Claramente perceptível	Aceitável
	4	0,540	2,50	Claramente perceptível	Aceitável

Em relação aos índices de aceleração em *RMS*, os limites colocados pela norma são colocados nas tabelas 7.8 e 7.9 e a averiguação é mostrada na tabela 7.10, conforme estabelece a ISO 2631 (1985 e 1997).

Para a consideração da exposição do público à vibração foi utilizado o tempo de duas horas, visto ser esse o período aproximado de jogo de futebol ou um show que porventura venha a acontecer no estádio. Para o cálculo das acelerações em *RMS* e *VDV* foi considerada a parte transiente inicial e a parte permanente das respostas, sendo utilizados os cinco primeiros segundos de cada uma das curvas de aceleração obtidas. Para a integração numérica foi considerado o passo igual a 0,01s.

A figura 7.62 apresenta a variação das acelerações com o tempo para o segundo ponto de análise, considerando o modelo de carregamento MC5 e a frequência de carga igual a 2,55Hz. A mencionada figura enfatiza ainda as respostas transiente inicial e permanente utilizadas para o cálculo das referidas acelerações. A transformada de Fourier para a situação levantada mostrando as maiores transferências de energia do carregamento para a resposta do sistema pode ser verificada na figura 7.63.

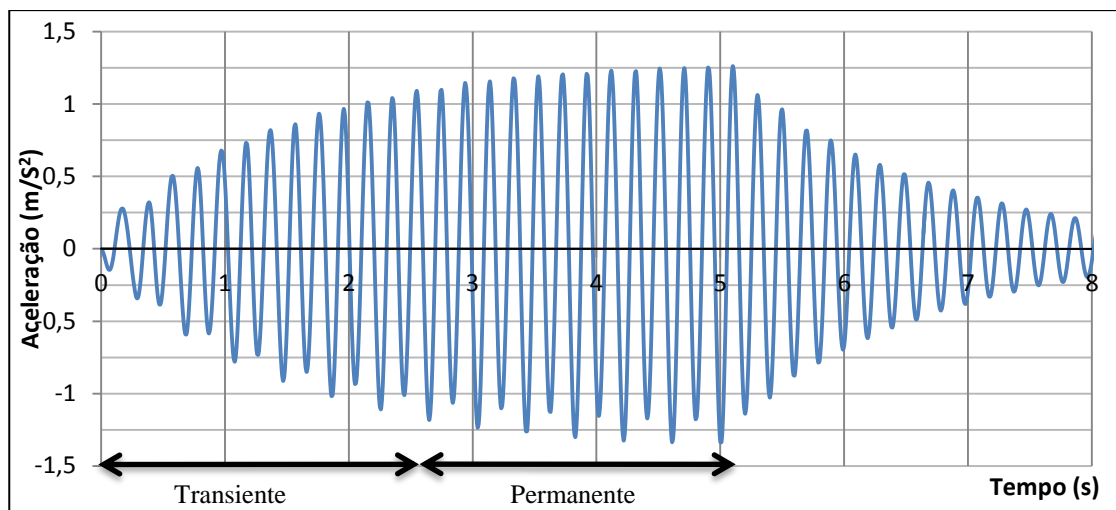


Figura 7.62 – Resposta transiente inicial e permanente para o ponto 2 – MC5, $f = 2,55\text{Hz}$

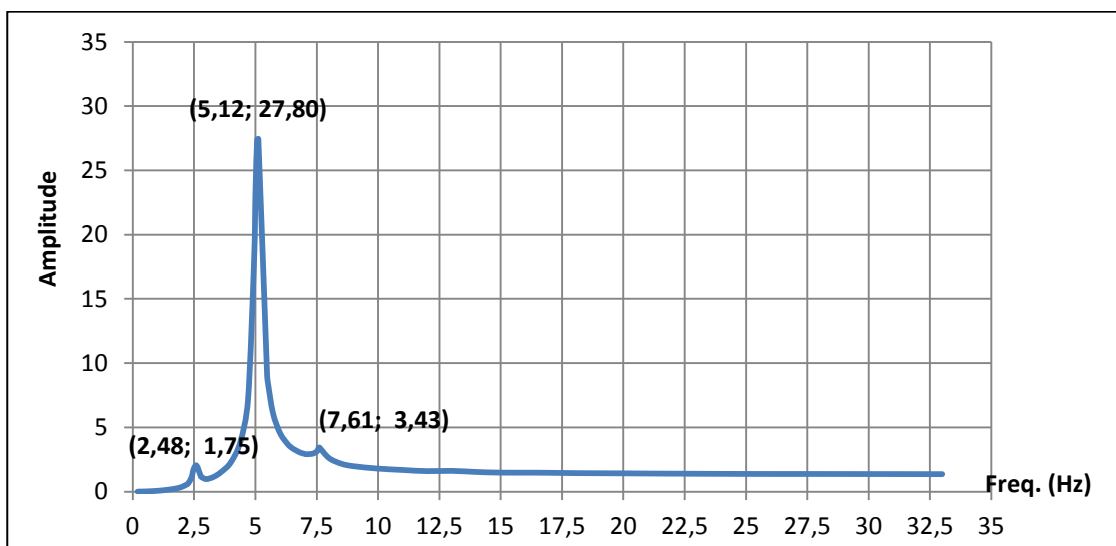


Figura 7.63 – Transformada de Fourier para o ponto 2 – MC5, $f = 2,55\text{Hz}$

Tabela 7.8 – Limites de acelerações em *RMS* segundo A ISO 2631 (1985)

Descrição da vibração	Aceleração em X e Y (m/s^2)	Aceleração em Z (m/s^2)
Não desconfortável	Menor que 0,25	Menor que 0,32
Nível de conforto reduzido	Entre 0,25 e 0,80	Entre 0,32 e 1,00
Causa a fadiga	Entre 0,80 a 1,60	Entre 1,00 e 2,00
Causa risco à saúde	Maior que 1,60	Maior que 2,00

Tabela 7.9 – Limites de acelerações em *RMS* segundo A ISO 2631 (1997)

Descrição da vibração	Aceleração em X, Y e Z (m/s^2)
Não desconfortável	Menor que 0,315
Nível de conforto reduzido	Entre 0,315 e 0,70
Pode trazer risco à saúde	Entre 0,70 e 1,60
Grande possibilidade de risco à saúde	Maior que 1,60

Tabela 7.10 – Análise dos limites normativos para aceleração em *RMS* na direção vertical

Modelo	Ponto	a_{rms} (m/s ²)	Frequência (Hz)	ISO 2631 (1985)	ISO 2631 (1997)
MC1	1	0,081	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,436	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,049	2,60	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,044	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
MC2	1	0,129	2,25	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,446	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,055	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,086	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
MC3	1	0,072	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,403	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,060	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,071	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável
MC4	1	0,131	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,410	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,057	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,135	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável
MC5	1	0,131	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,429	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,097	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,126	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável

N.C.R* => Nível de conforto reduzido

A averiguação quanto aos limites de acelerações em VDV é realizada conforme estabelece Ellis e Littler (2004) e Setareh (2012), cujos limites são apresentados nas tabelas 7.11 e 7.12. A verificação quanto ao nível de conforto das acelerações em VDV é mostrada na tabela 7.13.

Tabela 7.11 – Limites de acelerações em VDV segundo Ellis e Littler (2004)

Descrição da vibração	VDV (m/s ^{1,75})
Limite aceitável	Menor que 0,60
Baixa probabilidade de um comentário adverso	Entre 0,60 e 1,20
Possibilidade de um comentário negativo	Entre 1,20 e 2,40
Probabilidade de uma reação adversa	Entre 2,40 e 4,80
Inaceitável	Maior que 4,80

Tabela 7.12 – Limites de acelerações em VDV segundo Setareh (2012)

Descrição da vibração	VDV (m/s ^{1,75})
Limite aceitável	Menor que 0,50
Perturbador	Entre 0,50 e 3,50
Inaceitável	Entre 3,50 e 6,90
Provável condição de pânico	Maior que 6,90

Tabela 7.13 – Análise das acelerações em VDV na direção vertical

Modelo	Ponto	a_{rms} (m/s ²)	Frequência (Hz)	Ellis e Littler (2004)	Setareh (2012)
MC1	1	0,150	2,55	Aceitável	Aceitável
	2	0,742	2,55	B.P.C.A*	Perturbador
	3	0,095	2,60	Aceitável	Aceitável
	4	0,080	2,55	Aceitável	Aceitável
MC2	1	0,229	2,25	Aceitável	Aceitável
	2	0,762	2,55	B.P.C.A*	Perturbador
	3	0,100	2,55	Aceitável	Aceitável
	4	0,158	2,55	Aceitável	Aceitável
MC3	1	0,138	2,55	Aceitável	Aceitável
	2	0,701	2,55	B.P.C.A*	Perturbador
	3	0,114	2,55	Aceitável	Aceitável
	4	0,128	2,50	Aceitável	Aceitável
MC4	1	0,250	2,55	Aceitável	Aceitável
	2	0,710	2,55	B.P.C.A*	Perturbador
	3	0,106	2,55	Aceitável	Aceitável
	4	0,237	2,50	Aceitável	Aceitável
MC5	1	0,250	2,55	Aceitável	Aceitável
	2	0,752	2,55	B.P.C.A*	Perturbador
	3	0,176	2,55	Aceitável	Aceitável
	4	0,219	2,50	Aceitável	Aceitável

B.P.C.A*=> Baixa probabilidade de um comentário adverso

Conforme pode ser observado, a estrutura apresenta índices de vibração vertical aceitáveis para a maioria dos casos e pontos estudados, tendo apresentado falhas apenas para o segundo ponto de verificação, situação já observada por Lima (2013) e Campista (2015). Além disso, sempre que houve extrapolação dos limites de aceleração, a frequência de carregamento de 2,55Hz foi a que acarretou nas piores situações de conforto.

As verificações das vibrações no sentido tangencial são realizadas apenas conforme a ISO 2631 (1985 e 1997), uma vez que os demais normativos não apresentam limites para os eixos horizontais. A tabela 7.14 apresenta os resultados obtidos para o referido eixo.

Tabela 7.14 – Análise dos limites normativos para aceleração em *RMS* na direção radial

Modelo	Ponto	a_{rms} (m/s ²)	Frequência (Hz)	ISO 2631 (1985)	ISO 2631 (1997)
MC1	1	0,123	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,453	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,039	2,60	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,074	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
MC2	1	0,172	2,25	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,454	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,034	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,148	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
MC3	1	0,131	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,419	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,043	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,080	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável
MC4	1	0,223	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,422	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,033	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,161	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável
MC5	1	0,245	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,444	2,55	N.C.R*	N.C.R*
	3	0,035	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,164	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável

N.C.R* => Nível de conforto reduzido

Assim como ocorrido para as acelerações no sentido vertical, quando da verificação das acelerações no sentido radial a estrutura apresenta preocupação apenas para o segundo ponto de estudo, sendo também a frequência de carregamento de 2,55Hz a que acarreta nos maiores índices de vibração.

A verificação das acelerações para o sentido tangencial segue a mesma lógica da realizada para o sentido radial. Os resultados obtidos podem ser verificados na tabela 7.15.

Tabela 7.15 – Análise dos limites normativos para aceleração em *RMS* na direção tangencial

Modelo	Ponto	a_{rms} (m/s ²)	Frequência (Hz)	ISO 2631 (1985)	ISO 2631 (1997)
MC1	1	0,083	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,086	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
	3	0,087	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,082	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
MC2	1	0,031	2,25	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,011	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	3	0,004	2,25	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,003	2,25	Não desconfortável	Não desconfortável
MC3	1	0,100	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,102	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
	3	0,104	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,098	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
MC4	1	0,033	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,011	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	3	0,001	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,004	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável
MC5	1	0,032	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,011	2,55	Não desconfortável	Não desconfortável
	3	0,001	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,004	2,50	Não desconfortável	Não desconfortável

Considerando-se os resultados apresentados na tabela 7.15, pode ser verificado que as acelerações no sentido longitudinal encontram-se dentro dos limites aceitáveis estabelecidos pela ISO 2631 (1985 e 1997). No mais, os maiores valores ocorrem para os casos de carregamento MC1 e MC3, sendo que a pior situação ocorre para o terceiro ponto no terceiro modelo de cálculo adotado à frequência de carregamento de 2,75Hz.

Tendo em vista a recomendação feita por Rodrigues (2003), de se utilizar carregamentos no sentido tangencial em conjunto com os existentes no sentido vertical, realiza-se um sexto modelo de carregamento, com disposição dos torcedores igual à adotada no MC3, com frequência de carregamento igual a 2,75Hz e cargas tangenciais iguais a 1% das verticais, atuando ambas em conjunto nas arquibancadas. Os parâmetros adotados, tais como coeficiente de impacto, coeficiente de defasagem, tempo de contato e a quantidade

de ciclos utilizada segue a mesma lógica dos estudos anteriores. Os resultados em termos de acelerações *RMS* tangenciais obtidos são apresentados na tabela 7.16.

Tabela 7.16 – Análise dos limites normativos para aceleração em *RMS* na direção tangencial, levando em conta a carga horizontal adicional

Modelo	Ponto	a_{rms} (m/s ²)	Frequência (Hz)	ISO 2631 (1985)	ISO 2631 (1997)
MC6	1	0,108	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
	2	0,113	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
	3	0,116	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável
	4	0,107	2,75	Não desconfortável	Não desconfortável

Da tabela 7.16 pode ser visto que mesmo com a consideração de um carregamento horizontal no sentido tangencial, concomitante com o caso de carregamento e frequência que causaram a pior situação de conforto no sentido tangencial, a estrutura não apresenta índices preocupantes de vibração quando observada nos quatro pontos analisados. Dessa forma, opta-se pela análise com os dispositivos de atenuação apenas para as acelerações nos eixos radial e vertical.

7.5. ESTUDOS DE ATENUAÇÃO DAS VIBRAÇÕES COM O USO DE AMS E AMSM

Para o estudo de atenuação da vibração da arquibancada são realizadas 16 propostas de sintonização dos amortecedores a frequências próximas do segundo harmônico do carregamento (e dos três modos que mais contribuem para a aceleração no ponto onde ocorre a situação mais desfavorável de conforto da estrutura. A variação das propostas ocorre da seguinte forma:

- i. Para os quatro primeiros estudos são adotados dois AMS iguais, sendo um de cada lado da arquibancada. Os elementos são sintonizados com a quinta, sexta, e sétima frequências naturais, além do segundo harmônico do carregamento, respectivamente. Para essas propostas são consideradas razão de massas $\mu=0,001$.
- ii. Do quinto ao sétimo estudos também é adotado um AMS de cada lado da arquibancada, sintonizados com a sexta e sétima frequências naturais, além do

segundo harmônico do carregamento, respectivamente. A razão de massas considerada é a metade da anteriormente aplicada, ou seja, $\mu=0,0005$. A mesma lógica é adotada do oitavo ao décimo estudo, porém, para $\mu=0,00025$.

- iii. Para o décimo primeiro e décimo segundo estudos, são utilizados quatro AMS, sendo inseridos um sintonizado à sexta e um à sétima frequências naturais de cada lado da arquibancada. O valor de $\mu=0,0005$ é adotado na décima primeira proposta, enquanto que para a décima segunda é utilizado $\mu=0,00025$.
- iv. No décimo terceiro e décimo quarto estudos são adotados quatro AMSM, sendo dois de cada lado da estrutura. Os elementos são sintonizados próximos à sexta e à sétima frequências, respectivamente, considerando $\mu=0,0005$. O décimo quinto e décimo sexto estudos são semelhantes ao décimo terceiro e décimo quarto, diferenciando apenas pela razão de massas adotada, que é reduzida em 50%, ou seja, $\mu=0,00025$.

É importante fazer uma ressalva quanto à nomenclatura dada aos dispositivos de atenuação. Neste trabalho não é utilizado apenas um amortecedor, tendo em vista a simetria da estrutura, porém, se aplica em diversas propostas dois AMS iguais, situação que poderia ser confundida com o uso de AMSM. Assim, são chamados de AMS os elementos dimensionados conforme o critério proposto por Bakre e Jangid (2006), que oferece diretrizes para otimização destes dispositivos. Já para AMSM é adotado o critério de Jangid (2009), sendo assim chamados os elementos desta forma dimensionados.

A realização dos estudos considera a frequência de carregamento de 2,55Hz, uma vez que foi essa a que apresentou os piores níveis de aceleração. Com relação à disposição dos torcedores na arquibancada é adotado apenas o quinto modelo de carregamento, uma vez que provavelmente é o que mais ocorrerá durante a vida útil da estrutura, além de ter apresentado alguns dos índices mais preocupantes de vibração.

Todavia, ao final do capítulo são realizadas verificações da estrutura considerando os cinco modelos e as 15 frequências de carregamento abordadas, levando em conta a proposta que apresenta a maior redução de aceleração e a menor massa dos dispositivos de atenuação.

A título de ilustração e para não se tornar demasiadamente repetitivo, mostrar-se no item 7.6 um modelo genérico para as propostas de amortecedores obtidas.

7.5.1. Estudo 01 – Sintonização de dois AMS considerando a quinta frequência natural ($f_5 = 4,95\text{Hz}$) e $\mu=0,001$

O quinto modo de vibração possui a menor frequência natural entre os três modos considerados que contribuem para as acelerações no ponto dois. A primeira proposta de atenuação ocorre sintonizando os amortecedores próximos à essa frequência. Os amortecedores de massa sintonizados foram dimensionados e posicionados assim:

- Para o cálculo dos parâmetros dos amortecedores é utilizado o método de Bakre e Jangid (2006) a partir das equações 3.7 a 3.9 e 3.11 a 3.13.
- Devido à simetria da estrutura são inseridos dois AMS idênticos localizados nos pontos de maior deslocamento nodal da referida frequência em cada lado da estrutura. Conforme mostrado na análise modal, os maiores deslocamentos no quinto modo de vibração ocorrem nos pilares laterais e pelas extremidades superiores da arquibancada. Como os pilares têm deslocamento horizontal e os amortecedores são inseridos para trabalhar na vertical, a locação ocorre no ponto de maior amplitude modal vertical, ou seja, nas extremidades superiores, conforme mostrado na figura 7.66.

A tabela 7.17 apresenta os parâmetros otimizados dos amortecedores, conforme o método de Bakre e Jangid (2006):

Tabela 7.17 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 4,95Hz e $\mu = 0,001$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ϵ (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,0005	4,124	0,999	4,947	3984,295	1,118	2,866

Deve ser observado que a estrutura possui uma massa extremamente alta, de cerca de 8250 toneladas. Desta forma, optou-se por trabalhar com uma razão de massas bastante inferior ao normalmente adotada face aos elevados esforços internos que o amortecedor poderia causar na arquibancada. Por outro lado, uma vez que a proposta é pela utilização de dois amortecedores iguais, o valor de μ no final é de 0,001, sendo a quantidade 0,0005 expressa na tabela a razão de massa de cada AMS em relação à estrutura toda.

As figuras 7.64 e 7.65 apresentam a comparação das respostas em termos de acelerações para o ponto 2 e frequência de excitação igual a 2,55Hz para a estrutura com e sem controle. Os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são

mostrados na tabela 7.18. Conforme pode ser observado, essa proposta de emprego de AMS não trouxe benefício considerável para a estrutura. O espectro de acelerações do ponto 2 mostrado na figura 7.67 praticamente não se altera quando comparado ao da arquibancada sem os amortecedores e explica o porquê da ineficiência dessa proposta. Dessa forma, opta-se por realizar os próximos estudos de sintonização considerando-se a sexta e sétima frequência natural da estrutura e com o carregamento atuante.

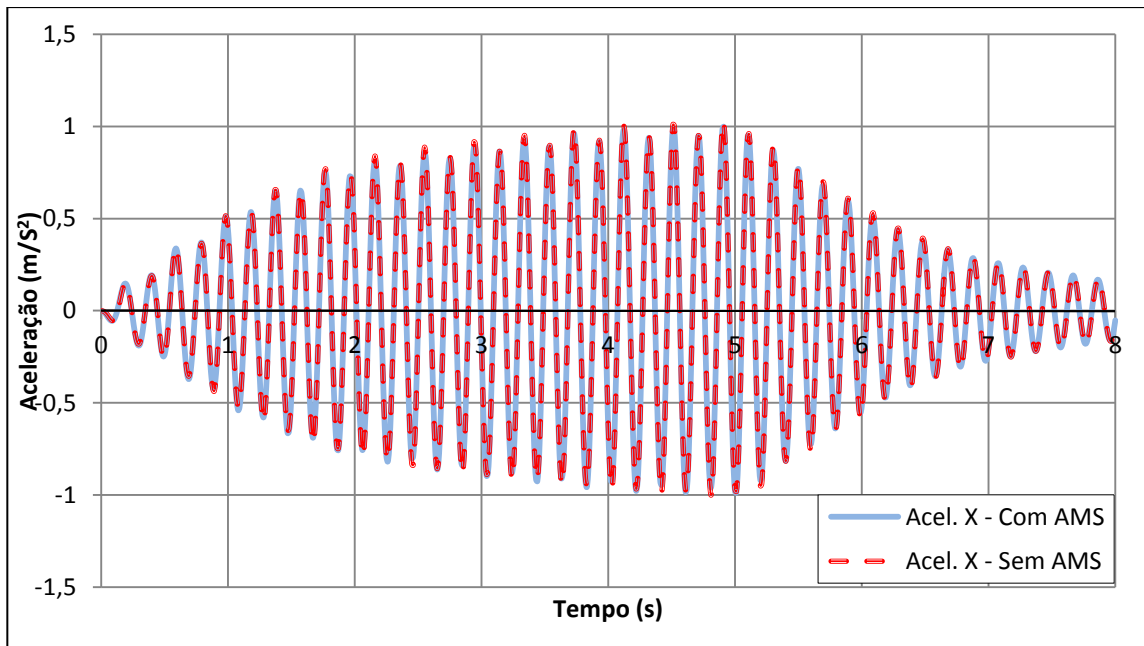


Figura 7.64 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 4,95Hz e $\mu=0,001$

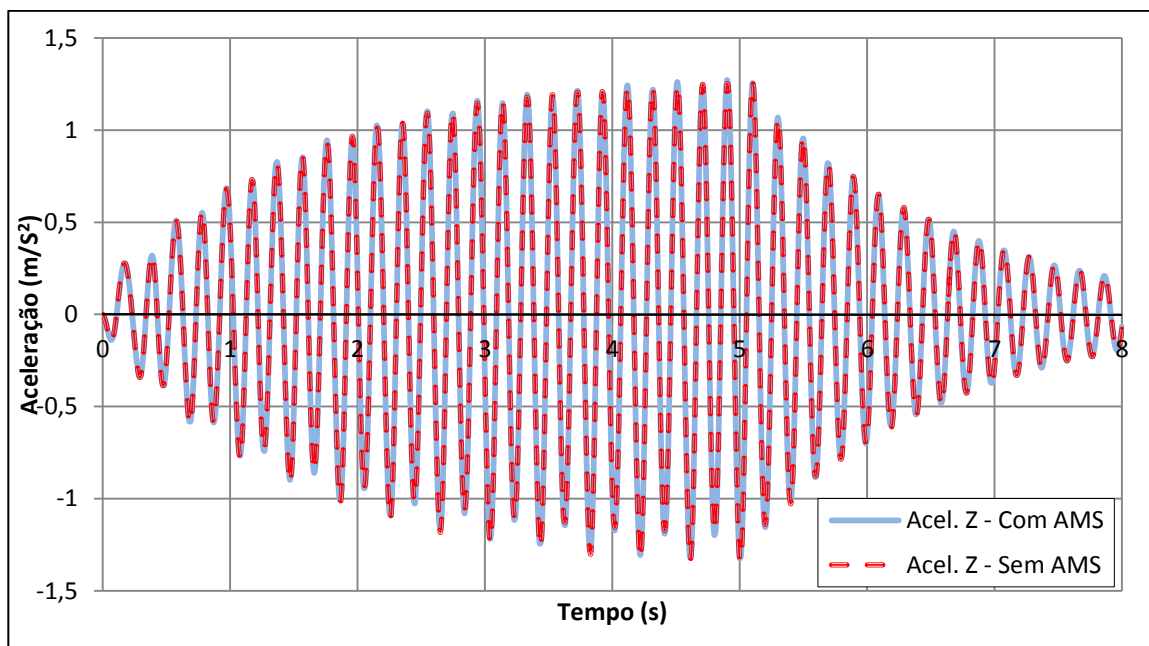


Figura 7.65 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 4,95Hz e $\mu=0,001$

Tabela 7.18 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a quinta frequência e $\mu=0,001$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,998	2,687	1,336	1,324	0,889
RMS	0,444	0,438	1,398	0,429	0,430	-0,123
VDV*	0,783	0,770	1,645	0,752	0,752	0,012

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

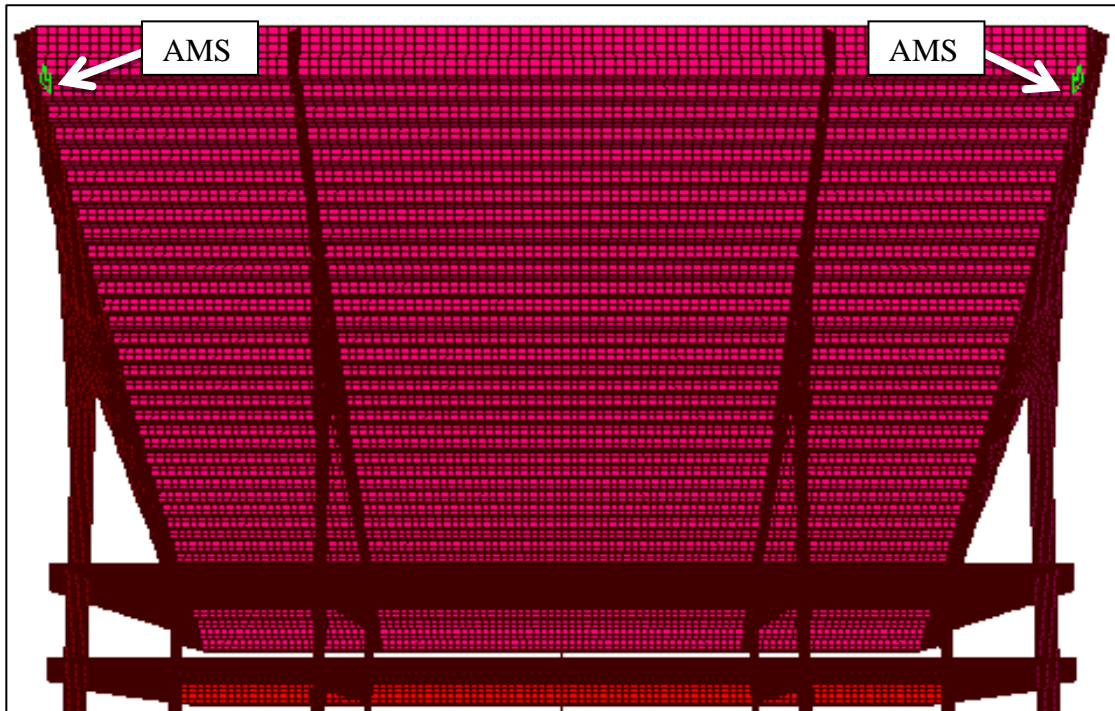


Figura 7.66 – Localização dos AMS para frequência de sintonização próxima de 4,95Hz

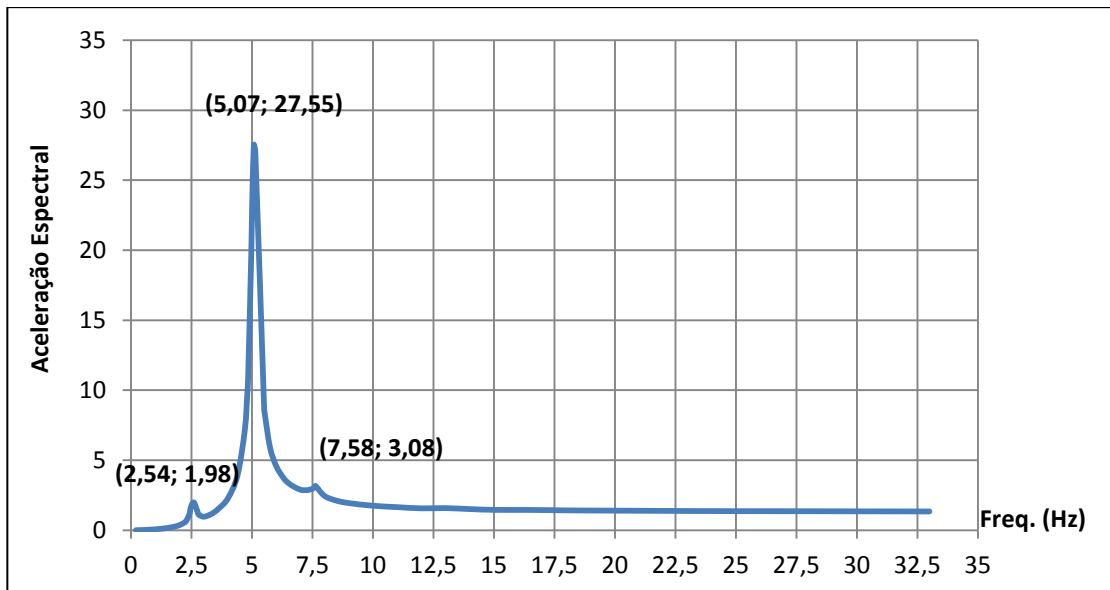


Figura 7.67 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 4,95Hz e $\mu=0,001$

7.5.2. Estudo 02 – Sintonização de dois AMS considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,001$

O segundo estudo apresenta a sintonização de dois amortecedores idênticos considerando a sexta frequência natural, cujo valor é de 5,07Hz. Cada dispositivo é instalado junto ao ponto de maior amplitude modal do sexto modo, ou seja, justamente o ponto 2 (ver figura 7.9), onde se extraem os valores de aceleração. Uma vez que a arquibancada é simétrica, instala-se um dispositivo de cada um de seus lados, conforme indica a figura 7.70.

Assim como no estudo anterior é aplicado o método de Bakre e Jangid (2006) e as equações 3.7 a 3.9, e 3.11 a 3.13 para o dimensionamento do AMS.

A tabela 7.19 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros otimizados dos amortecedores, segundo o método de Bakre e Jangid (2006):

Tabela 7.19 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,001$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ϵ (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,0005	4,124	0,999	5,067	4179,919	1,118	2,935

Também nessa proposta se trabalha com uma razão de massas baixa, face aos elevados esforços internos que o amortecedor poderia causar na arquibancada, porém, uma vez que a proposta é pela utilização de dois amortecedores iguais, o valor de μ no final é de 0,001, expresso pela soma da razão entre a massa de cada AMS e a estrutura toda.

As figuras 7.68 e 7.69 apresentam a comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com controle e sem controle no caso analisado. Os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.20. Diferentemente do estudo anterior, essa proposta de emprego de AMS trouxe benefícios significativos para o controle das vibrações na estrutura. A figura 7.71 apresenta o espectro de acelerações verticais para a situação analisada, de onde se pode observar uma redução considerável no valor de pico para frequências próximas ao segundo harmônico do carregamento quando comparado ao espectro sem os dispositivos de atenuação (figura 7.60), o que explica a eficiência da proposta.

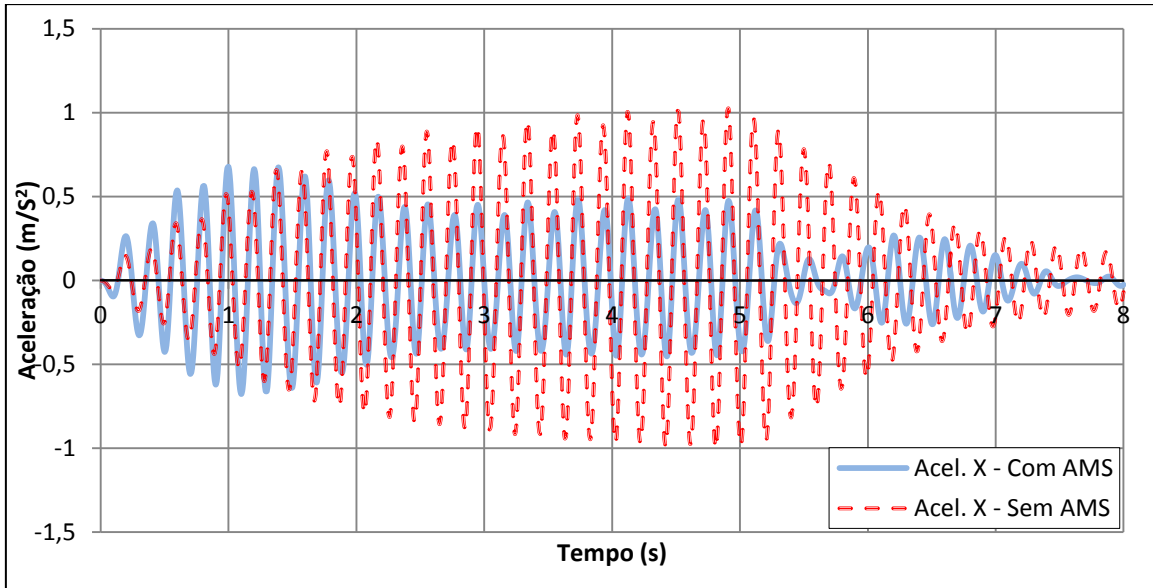


Figura 7.68 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,067Hz e $\mu=0,001$

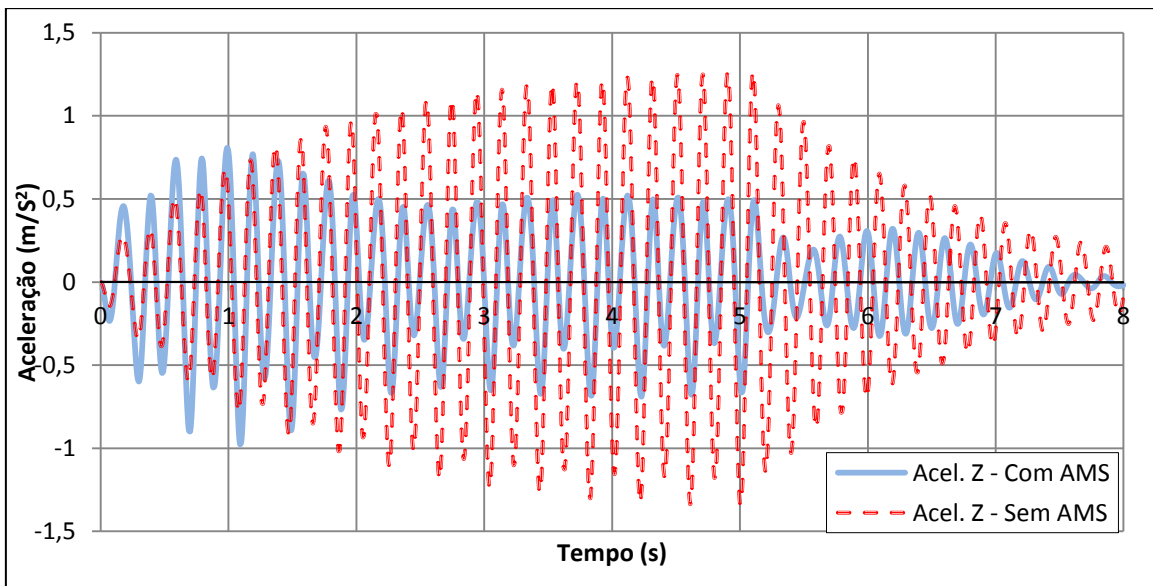


Figura 7.69 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,067Hz e $\mu=0,001$

Tabela 7.20 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta frequência e $\mu=0,001$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,668	26,935	1,336	0,976	33,900
RMS	0,444	0,277	37,699	0,429	0,249	41,983
VDV*	0,783	0,479	38,803	0,752	0,441	41,331

* As acelerações em VDV são expressas em $m/s^{1,75}$

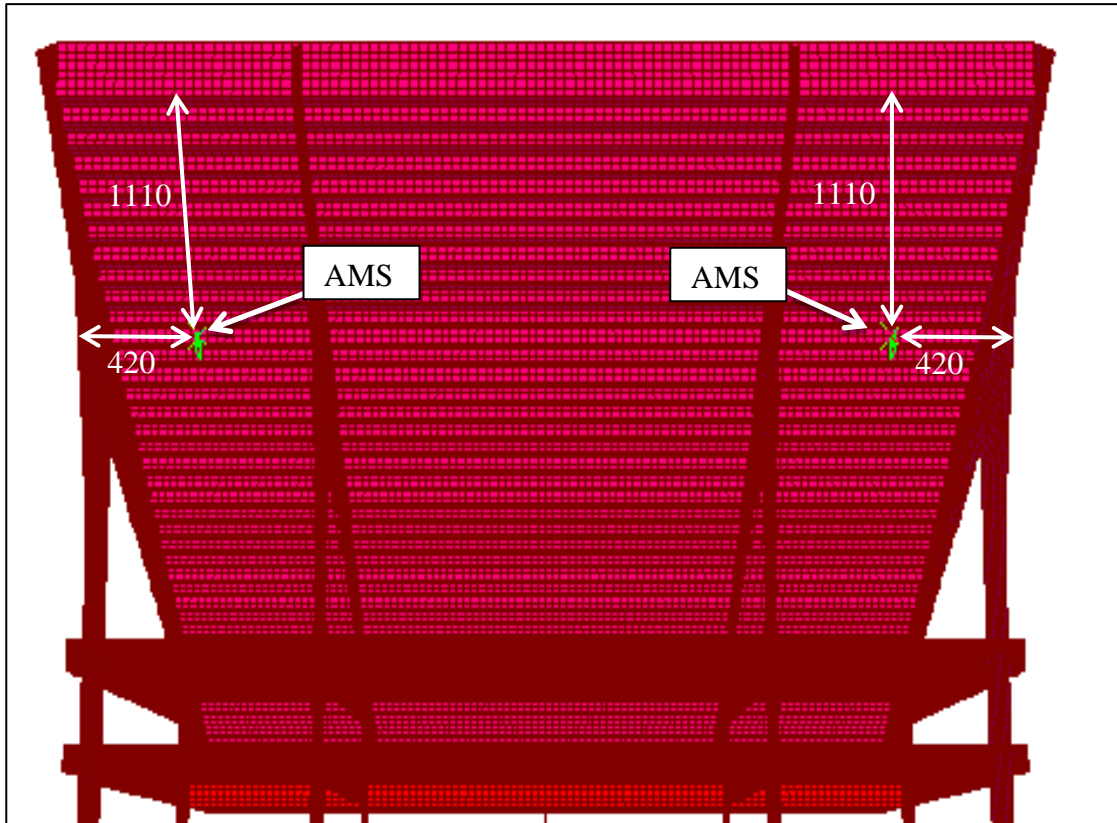


Figura 7.70 – Localização dos AMS para frequência de sintonização próxima de 5,07Hz, 5,10Hz e 5,12Hz

Para a localização dos AMS apresentado na figura 7.70 são adotadas medidas em centímetros. As distâncias são apresentadas para o plano inclinado da arquibancada, iniciando nas faces externas do último degrau e dos pilares laterais até o centro do dispositivo de atenuação.

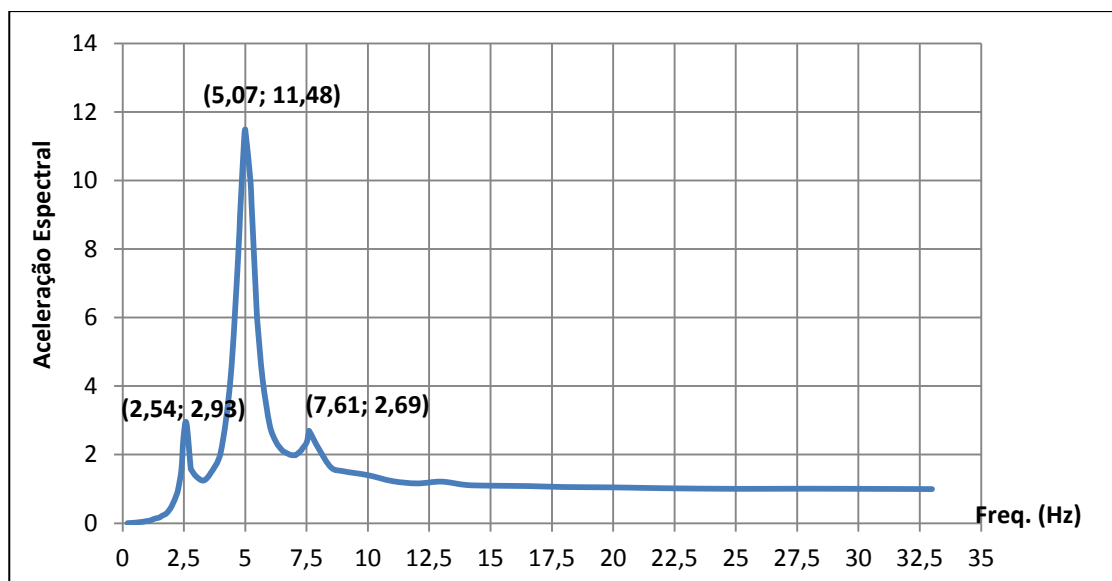


Figura 7.71 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,001$

7.5.3. Estudo 03 – Sintonização de dois AMS considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,001$

O terceiro estudo apresenta a sintonização de dois amortecedores idênticos considerando a sétima frequência natural, cujo valor é de 5,12Hz. Assim como feito anteriormente, cada dispositivo é instalado junto ao ponto de maior amplitude modal do modo sintonizado, que também nesse caso ocorre para o ponto 2 (ver figura 7.10). A locação dos AMS é a mesma indicada na figura 7.70.

Para esse estudo também se aplica o método de Bakre e Jangid (2006) e as equações 3.7, a 3.9 e 3.11 a 3.13 para o dimensionamento do AMS. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.21.

Tabela 7.21 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,001$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ϵ (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,05	4,124	0,999	5,117	4262,770	1,118	2,964

As figuras 7.73 e 7.74 apresentam a comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com controle e sem controle. Os valores de aceleração de pico e RMS para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.22. Como pode ser visto essa proposta de emprego de AMS também trouxe benefícios significativos para o controle das vibrações, porém, também acrescenta esforços significativos na análise estática. O espectro de acelerações apresentado na figura 7.72 mostra um pico cerca de 60% inferior ao obtido para a estrutura sem o uso dos AMS e explica a redução obtida.

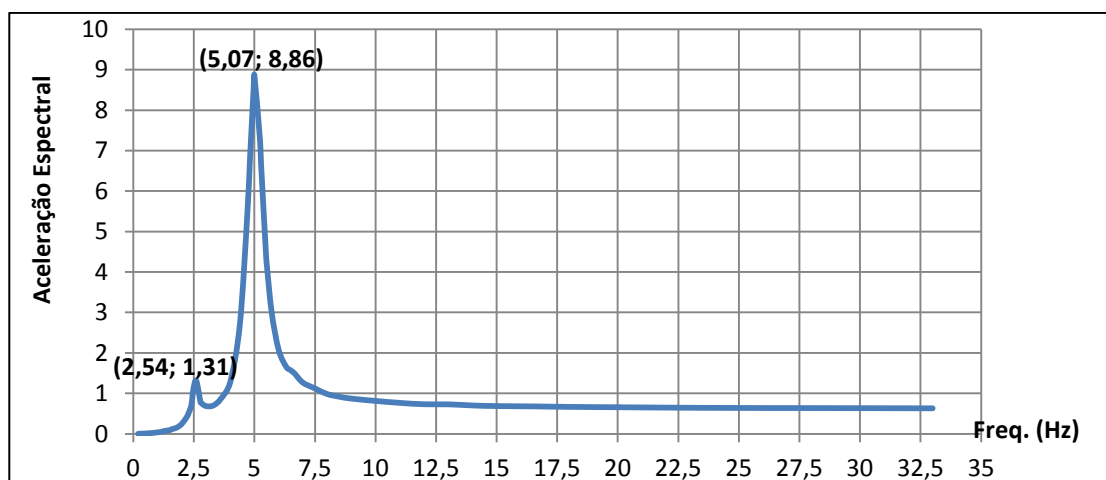


Figura 7.72 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,001$

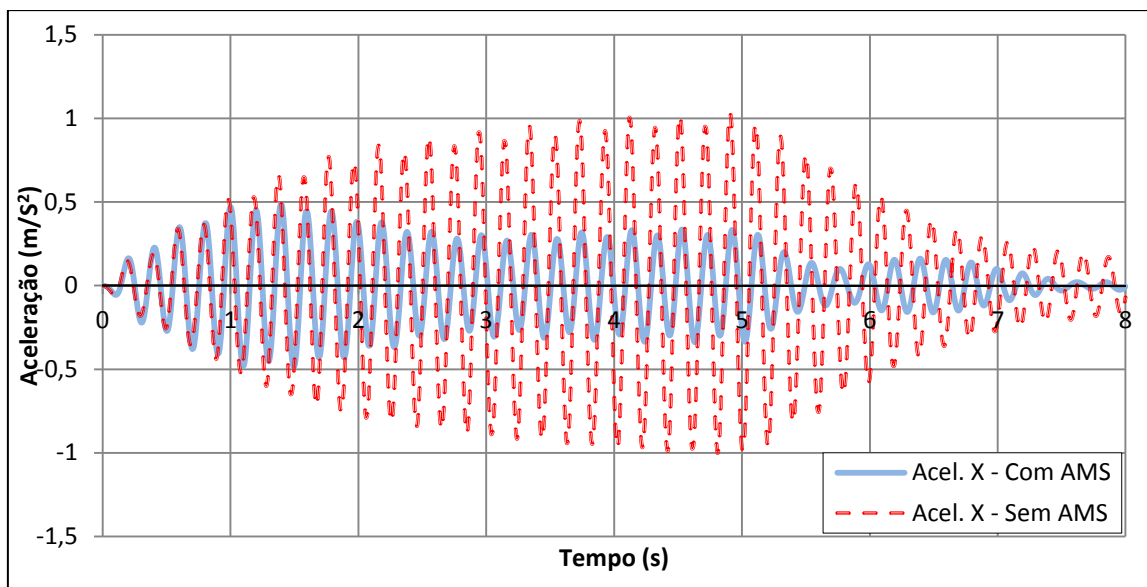


Figura 7.73 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,001$

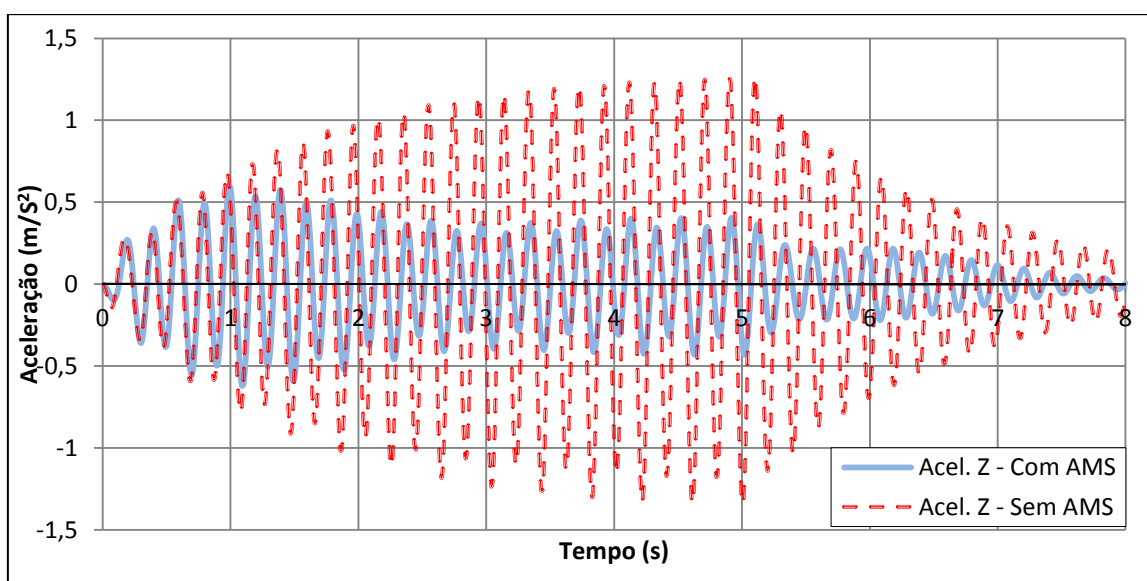


Figura 7.74 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,001$

Tabela 7.22 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sétima frequência e $\mu=0,001$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,483	52,895	1,336	0,621	53,504
<i>RMS</i>	0,444	0,195	56,127	0,429	0,178	58,498
VDV*	0,783	0,339	56,732	0,752	0,310	58,758

* As acelerações em VDV são expressas em $m/s^{1,75}$

7.5.4. Estudo 04 – Sintonização de dois AMS considerando o segundo harmônico da frequência de excitação ($f_{2h} = 5,10\text{Hz}$) e $\mu=0,001$

O quarto estudo apresenta a sintonização de dois amortecedores idênticos próximos ao segundo harmônico da frequência de excitação do sistema, cujo valor é de 5,10Hz. A instalação dos AMS também ocorre no ponto mostrado na figura 7.70.

Para esse estudo também se aplica o método de Bakre e Jangid (2006) e as equações 3.7, a 3.9 e 3.11 a 3.13 para o dimensionamento do AMS. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.23.

Tabela 7.23 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu = 0,001$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{\text{ótimo}}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ε (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,05	4,124	0,999	5,097	4229,532	1,118	2,953

As figuras 7.76 e 7.77 apresentam a comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com controle e sem controle. Os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.24. Como nos dois últimos estudos, nessa proposta o espectro de acelerações também apresenta pico bastante inferior ao obtido para a estrutura sem o uso dos AMS, conforme mostra a figura 7.75, explicando a eficácia do emprego dos AMS na redução das acelerações. No entanto, a massa inserida é bastante alta e pode causar alteração expressiva dos esforços solicitantes. Dessa forma são estudadas em seguida soluções com massa reduzida, cujo intuito é diminuir esforços da análise estática sem inviabilizar a solução de controle estrutural.

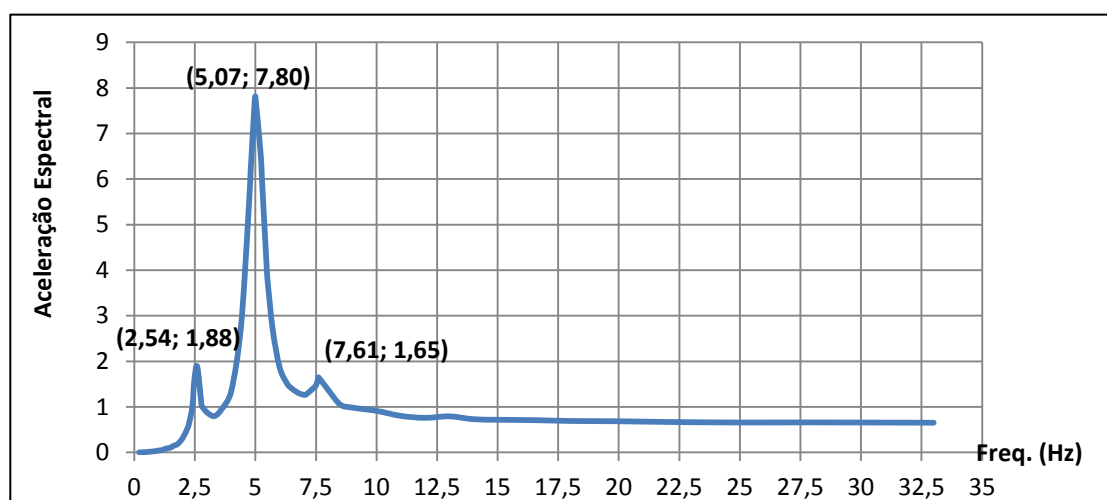


Figura 7.75 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,001$

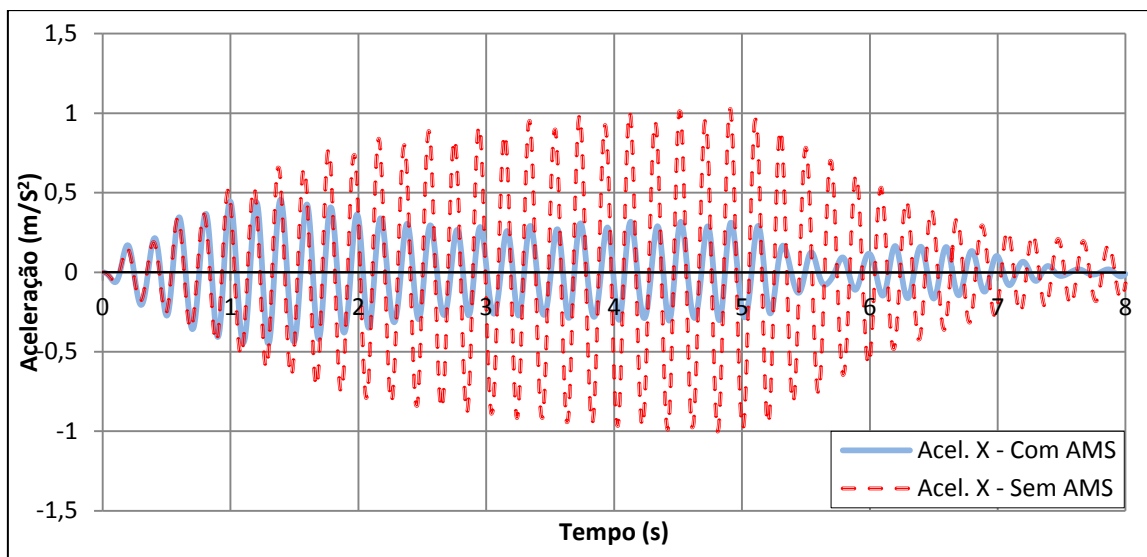


Figura 7.76 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,001$

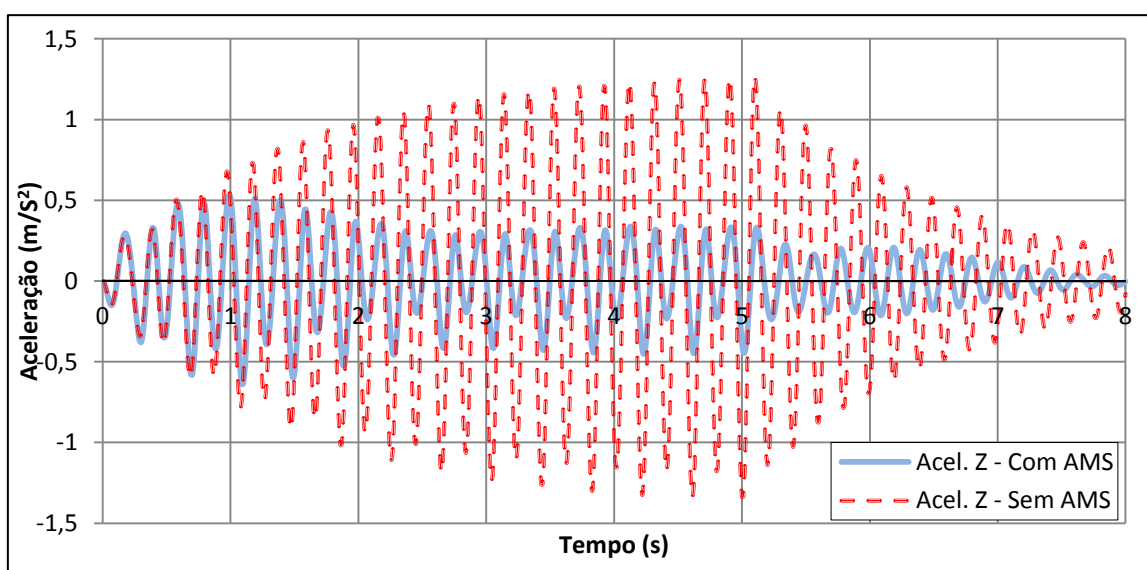


Figura 7.77 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,001$

Tabela 7.24 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando o segundo harmônico do carregamento e $\mu=0,001$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,456	52,096	1,336	0,640	55,476
RMS	0,444	0,184	58,635	0,429	0,163	61,951
VDV*	0,783	0,319	59,228	0,752	0,291	61,279

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

7.5.5. Estudo 05 – Sintonização de dois AMS considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$

O quinto estudo é semelhante ao realizado no segundo, porém, com a massa dos AMS reduzida em 50%. A instalação dos dispositivos segue a mesma linha dos estudos anteriores e a locação é mesma apresentada na figura 7.70.

Os parâmetros dos AMS são calculados pelo método de Bakre e Jangid (2006), conforme equações 3.7 a 3.9 e 3.11 a 3.13. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.25.

Tabela 7.25 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,0005$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ϵ (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,025	2,062	1,000	5,068	2091,018	0,790	1,038

As figuras 7.78 e 7.79 apresentam a comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com controle e sem controle. Os valores de aceleração de pico, em RMS e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.26. A resposta em termos de acelerações de pico foi inferior nesse modelo quando comparado ao segundo estudado, no entanto, a resposta permanente apresenta valores bastante próximos para ambos os modelos, da ordem de $0,5 \text{ m/s}^2$. Uma vez que esse modelo apresenta redução de 50% na massa do AMS, entende-se que essa proposta se mostra mais viável, visto que também reduz as acelerações a níveis aceitáveis, causa menos esforços na estrutura e apresenta menor custo de implantação.

O espectro de acelerações obtido para esse estudo é mostrado na figura 7.80 e apresenta redução considerável no pico quando comparado ao da estrutura sem o uso dos AMS, o que explica a eficácia da aplicação dos dispositivos.

Tabela 7.26 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta frequência e $\mu=0,0005$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,538	47,484	1,336	0,715	46,450
RMS	0,444	0,234	47,386	0,429	0,216	49,587
VDV*	0,783	0,401	48,819	0,752	0,372	50,557

* As acelerações em VDV são expressas em $\text{m/s}^{1,75}$

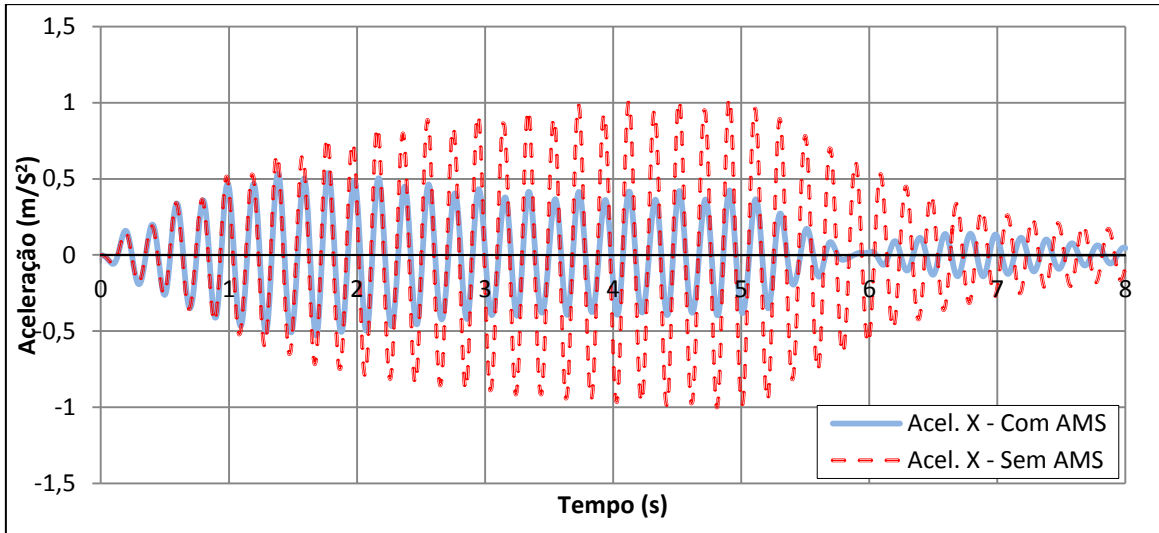


Figura 7.78 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$

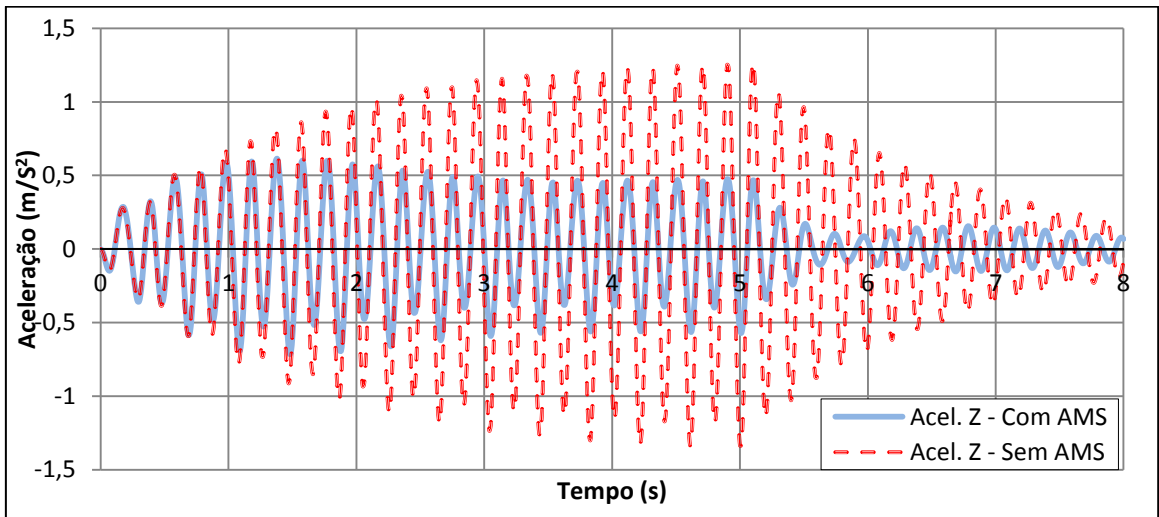


Figura 7.79 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$

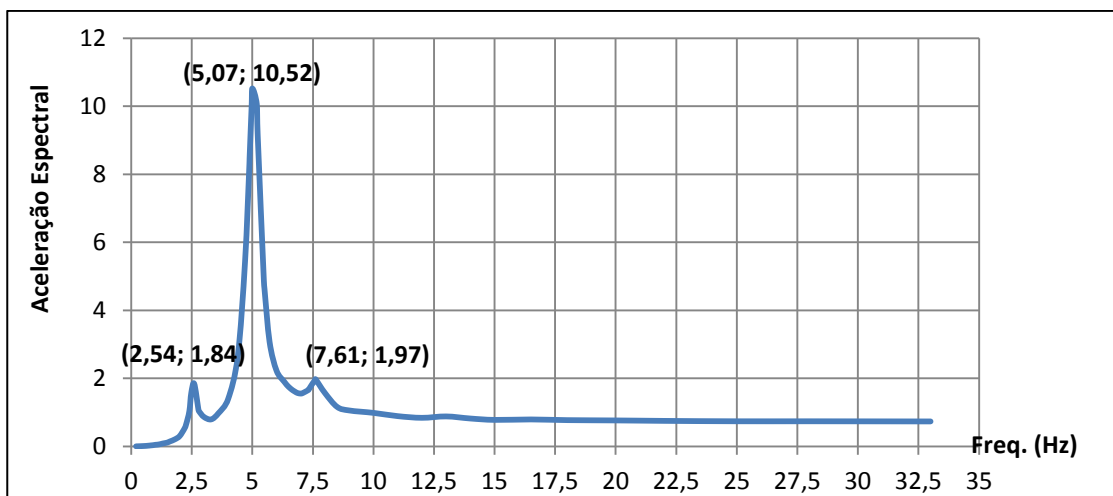


Figura 7.80 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$

7.5.6. Estudo 06 – Sintonização de dois AMS considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$

O sexto estudo é similar ao terceiro efetuado, porém, com a massa dos AMS reduzida em 50%. A instalação dos dispositivos segue a mesma linha dos estudos anteriores e a locação é mesma apresentada na figura 7.70.

Os parâmetros dos AMS são calculados pelo método de Bakre e Jangid (2006), conforme equações 3.7 a 3.9 e 3.11 a 3.13. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.27.

Tabela 7.27 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,0005$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ϵ (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,025	2,062	1,000	5,118	2132,465	0,790	1,048

As figuras 7.82 e 7.83 apresentam a comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com controle e sem controle. Os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.28. Apesar de inferiores quando comparado ao caso anterior que utilizava $\mu = 0,001$, essa proposta de emprego de AMS também trouxe benefícios significativos para a estrutura no controle das vibrações. A redução das acelerações neste modelo foi de cerca de 9% inferior à obtida para a sintonização próxima a 5,12Hz e $\mu=0,001$, porém, com massa do AMS 50% inferior.

O espectro de acelerações obtido para esse estudo é mostrado na figura 7.81 e apresenta redução de pico de cerca de 50%, quando comparado ao da estrutura sem AMS.

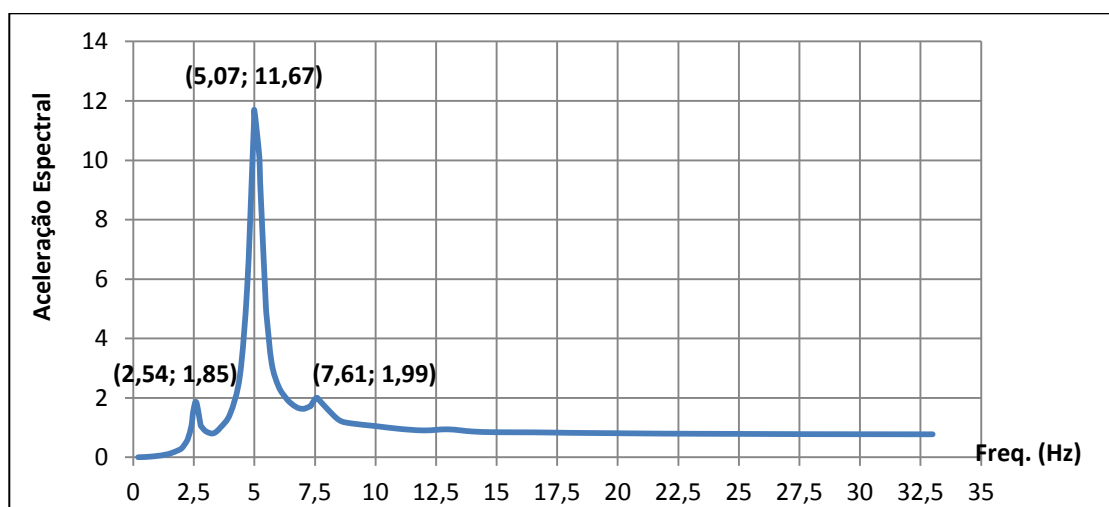


Figura 7.81 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$

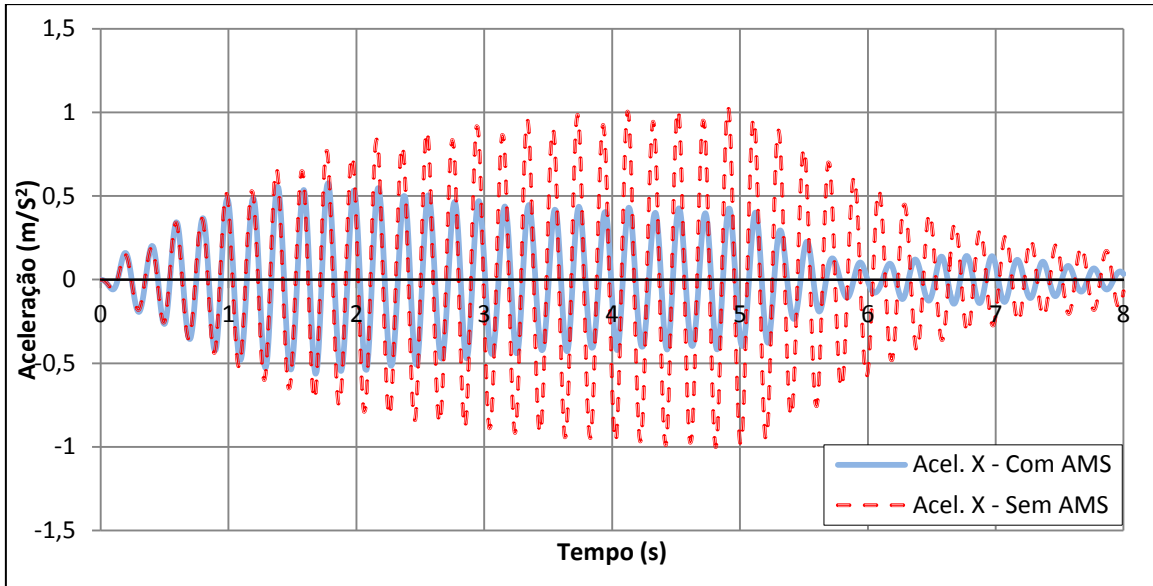


Figura 7.82 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$

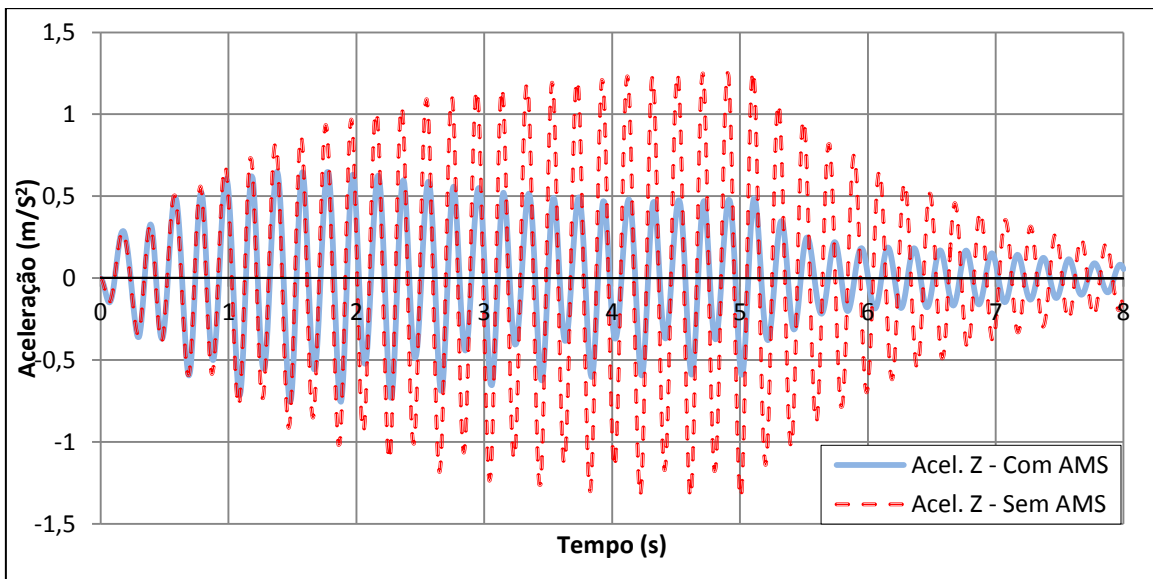


Figura 7.83 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$

Tabela 7.28 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sétima frequência e $\mu=0,0005$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,576	43,812	1,336	0,775	43,464
RMS	0,444	0,251	43,575	0,429	0,230	46,485
VDV*	0,783	0,430	45,062	0,752	0,397	47,230

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

7.5.7. Estudo 07 – Sintonização de dois AMS considerando o segundo harmônico da frequência de excitação ($f_{2h} = 5,10\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$

O sétimo estudo apresenta a sintonização de dois amortecedores idênticos com o segundo harmônico da frequência de excitação do sistema, cujo valor é de 5,10Hz. A instalação dos AMS também ocorre no ponto mostrado na figura 7.70.

Os parâmetros dos AMS são calculados pelo método de Bakre e Jangid (2006), conforme equações 3.7 a 3.9 e 3.11 a 3.13. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.29.

Tabela 7.29 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu = 0,0005$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{\text{ótimo}}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ε (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,025	2,062	0,999	5,098	2115,837	0,790	1,044

A comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com controle e sem controle pode ser visualizada através das figuras 7.85 e 7.86, enquanto que os valores de aceleração de pico, *RMS* e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.30. Dos valores da tabela se pode observar que a redução para este modelo é um pouco menor que a ocorrida para o estudo apresentado na quinta proposta, mas, supera o resultado obtido para a sexta proposta estudada.

O espectro de acelerações pode ser visualizado na figura 7.84 e apresenta redução de cerca de 50% em relação à estrutura sem os amortecedores e explica a eficácia obtida.

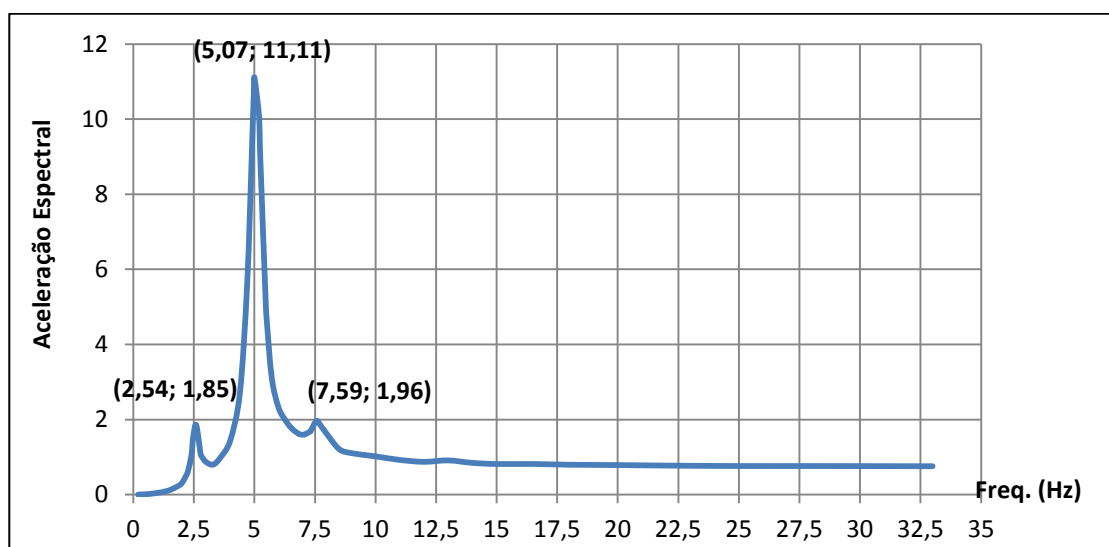


Figura 7.84 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$

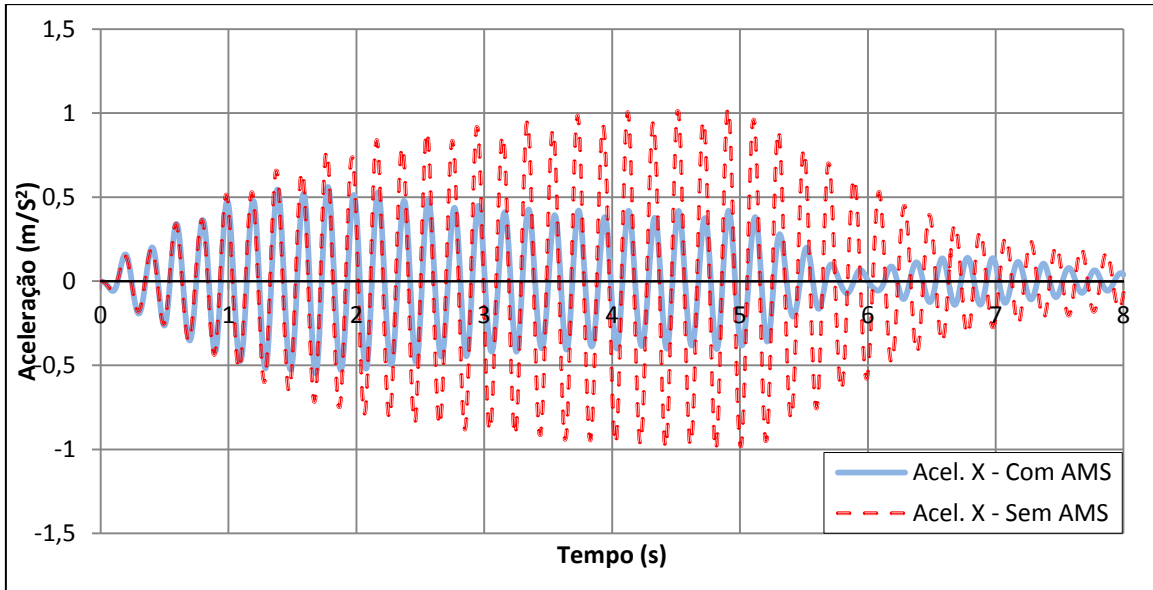


Figura 7.85 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$

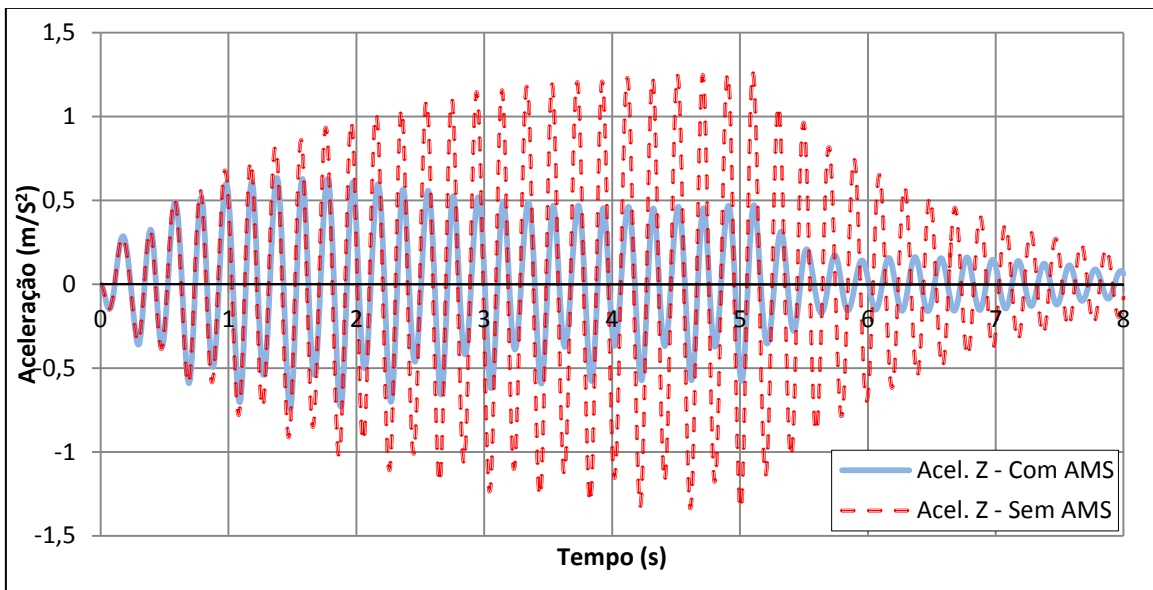


Figura 7.86 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$

Tabela 7.30 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando o segundo harmônico do carregamento e $\mu=0,0005$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,560	45,357	1,336	0,738	44,709
RMS	0,444	0,242	45,521	0,429	0,222	48,186
VDV*	0,783	0,416	46,928	0,752	0,384	48,943

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

7.5.8. Estudo 08 – Sintonização de dois AMS considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$

O oitavo estudo apresenta a sintonização de dois amortecedores idênticos considerando a sexta frequência natural, cujo valor é de 5,07Hz, assim como foi feito quinto estudo, porém, com a massa reduzida em 50%.

O dimensionamento dos AMS é feito segundo o método de Bakre e Jangid (2006) e as equações 3.7 a 3.9 e 3.11 a 3.13. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.31.

Tabela 7.31 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,00025$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{\text{ótimo}}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ϵ (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,0125	1,031	1,000	5,069	1045,803	0,559	0,367

A comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com controle e sem controle pode ser verificada nas figuras 7.88 e 7.89. Já os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.32. Apesar da redução na eficiência do AMS quando comparado aos que utilizam massa de cerca de duas toneladas, as respostas em RMS e VDV ainda se encontram dentro dos limites aceitáveis.

O espectro de acelerações pode ser visualizado na figura 7.87 e apresenta redução no pico de quase 40% em relação à estrutura sem os amortecedores.

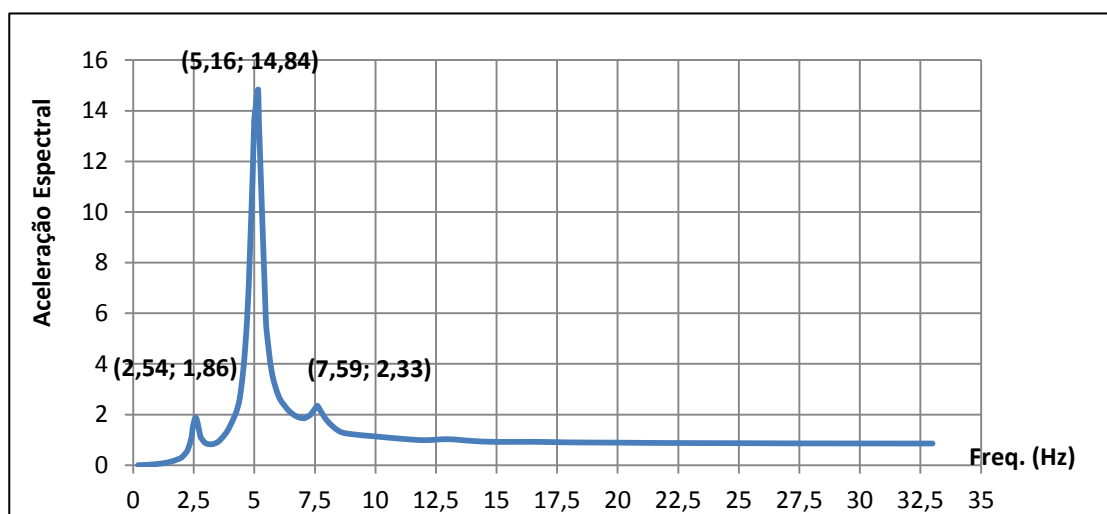


Figura 7.87 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$

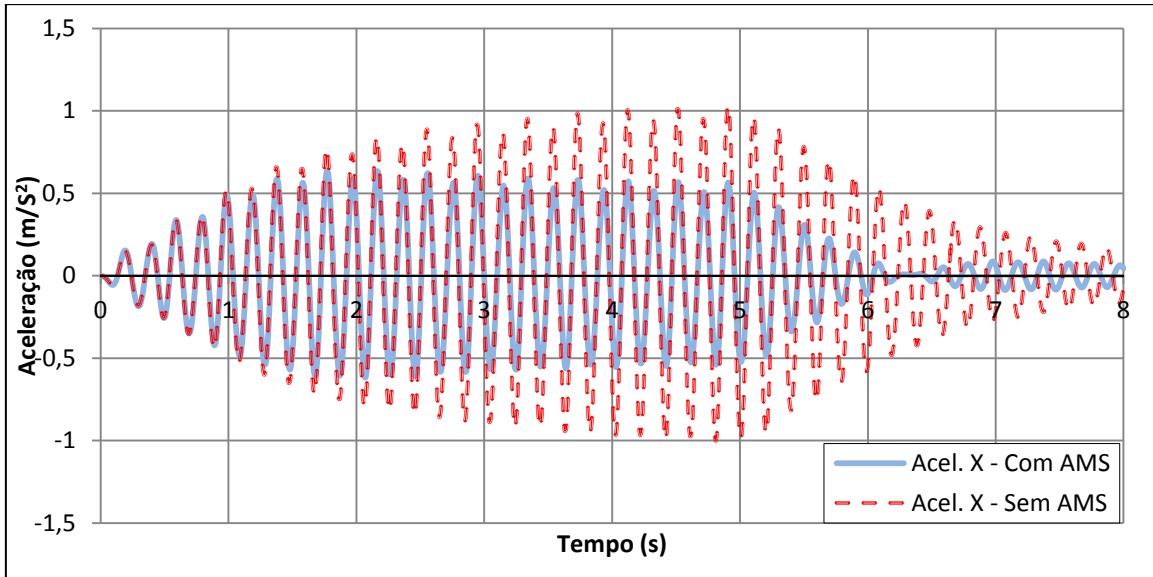


Figura 7.88 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$

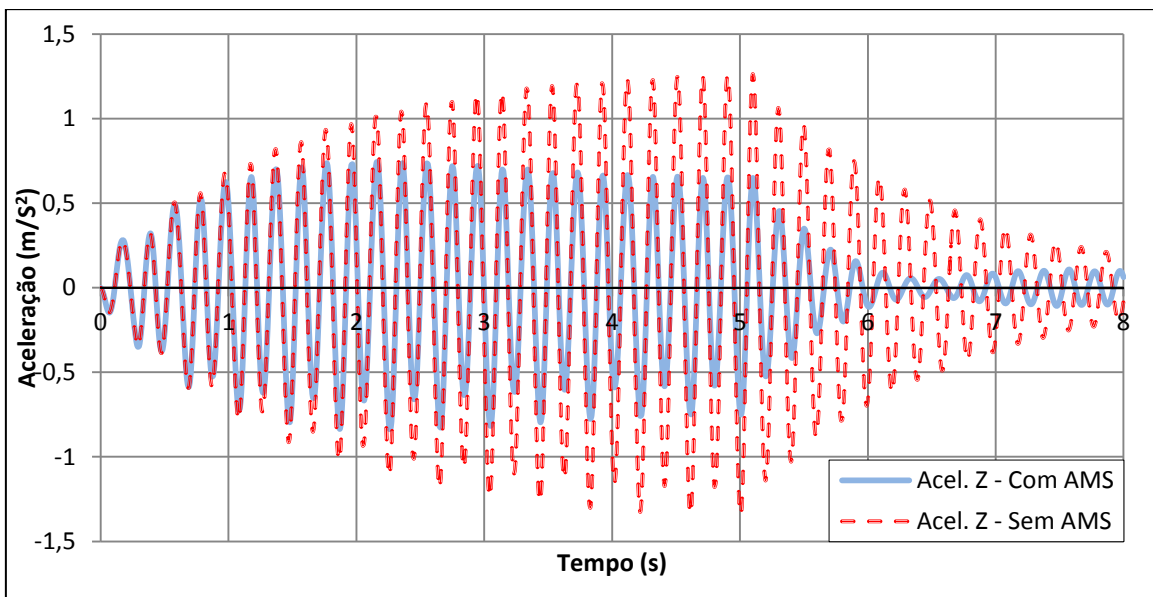


Figura 7.89 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$

Tabela 7.32 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta frequência e $\mu=0,00025$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,638	37,805	1,336	0,836	37,407
RMS	0,444	0,297	33,089	0,429	0,280	34,627
VDV*	0,783	0,509	34,979	0,752	0,479	36,302

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

7.5.9. Estudo 09 – Sintonização de dois AMS considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$

O nono estudo apresenta a sintonização de dois amortecedores idênticos próximos à sétima frequência natural, cujo valor é de 5,12Hz. A proposta é parecida com a desenvolvida no sexto estudo, porém, com a massa reduzida em 50%.

O dimensionamento dos AMS é feito segundo o método de Bakre e Jangid (2006) e as equações 3.7 a 3.9 e 3.11 a 3.13. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.33.

Tabela 7.33 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,00025$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{\text{ótimo}}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ε (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,0125	1,031	1,000	5,119	1066,532	0,559	0,371

As figuras 7.91 e 7.92 apresentam a comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com e sem controle, para os eixos vertical e radial. Os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são apresentados na tabela 7.34. Apesar de as acelerações obtidas nessa proposta serem superiores às encontradas no estudo anterior, os valores em RMS e VDV ainda se encontram dentro dos limites aceitáveis.

O espectro de acelerações pode ser visualizado na figura 7.90 e apresenta redução no pico de mais de 35% em relação à estrutura sem os AMS e justifica o resultado obtido.

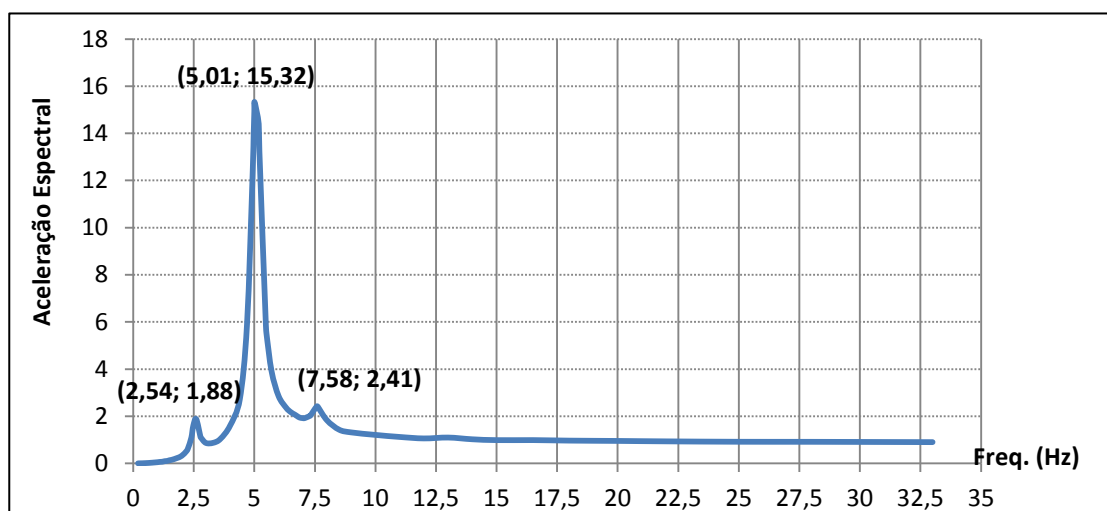


Figura 7.90 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$

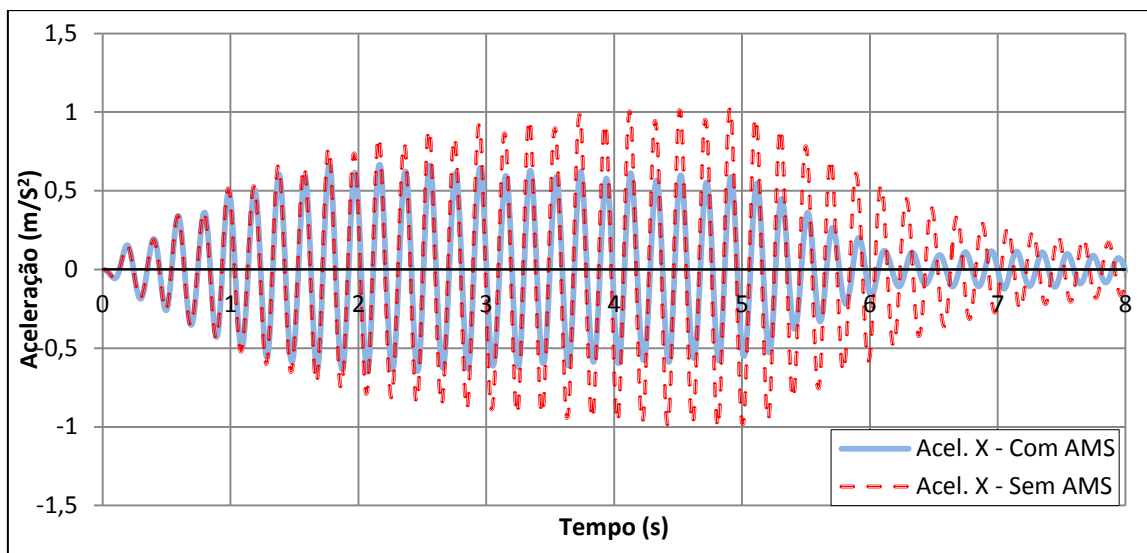


Figura 7.91 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$

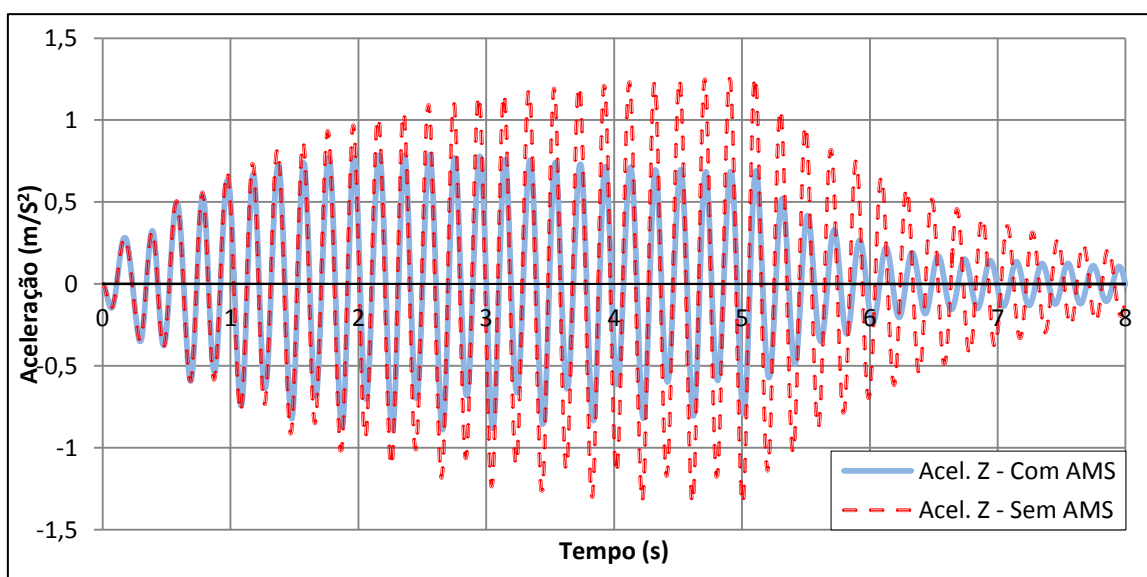


Figura 7.92 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$

Tabela 7.34 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sétima frequência e $\mu=0,00025$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,664	35,195	1,336	0,889	33,402
RMS	0,444	0,315	29,138	0,429	0,296	31,101
VDV*	0,783	0,540	31,034	0,752	0,506	32,653

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

7.5.10. Estudo 10 – Sintonização de dois AMS considerando o segundo harmônico da frequência de excitação ($f_{2h} = 5,10\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$

O décimo estudo apresenta a sintonização de dois amortecedores idênticos considerando o segundo harmônico do carregamento, cuja frequência é igual a 5,10Hz. A proposta é análoga à desenvolvida no sétimo estudo, porém, com a metade da massa em cada AMS.

O dimensionamento dos amortecedores é feito segundo o método de Bakre e Jangid (2006) e as equações 3.7 a 3.9 e 3.11 a 3.13. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.35.

Tabela 7.35 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu = 0,00025$

Parâmetro	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f (Hz)	k (KN/m)	ϵ (%)	c KN*S/m
	8247,910	0,025	1,031	1,000	5,099	1058,216	0,559	0,369

As figuras 7.94 e 7.95 apresentam as comparações entre as acelerações do ponto estudado para os eixos vertical e radial com e sem os AMS. Já os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.36. Esse modelo também apresenta menor eficiência quando comparado ao que adota massa de duas toneladas, porém, as respostas em RMS e VDV ainda estão dentro dos limites aceitáveis.

O espectro de acelerações é apresentado na figura 7.93 e apresenta redução no pico de mais de 35% em relação à estrutura sem os AMS, justificando o resultado obtido.

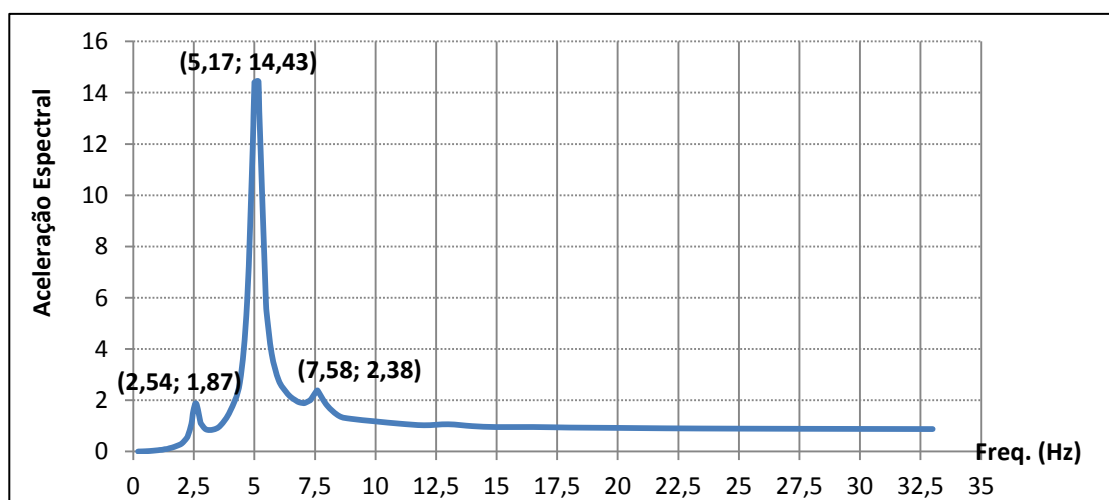


Figura 7.93 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,00025$

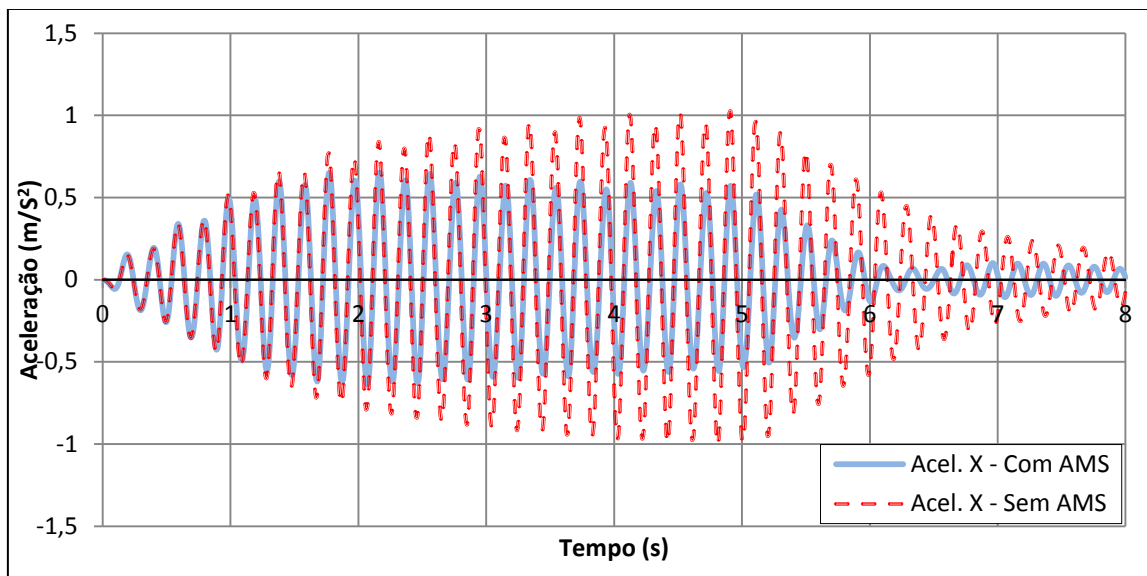


Figura 7.94 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$

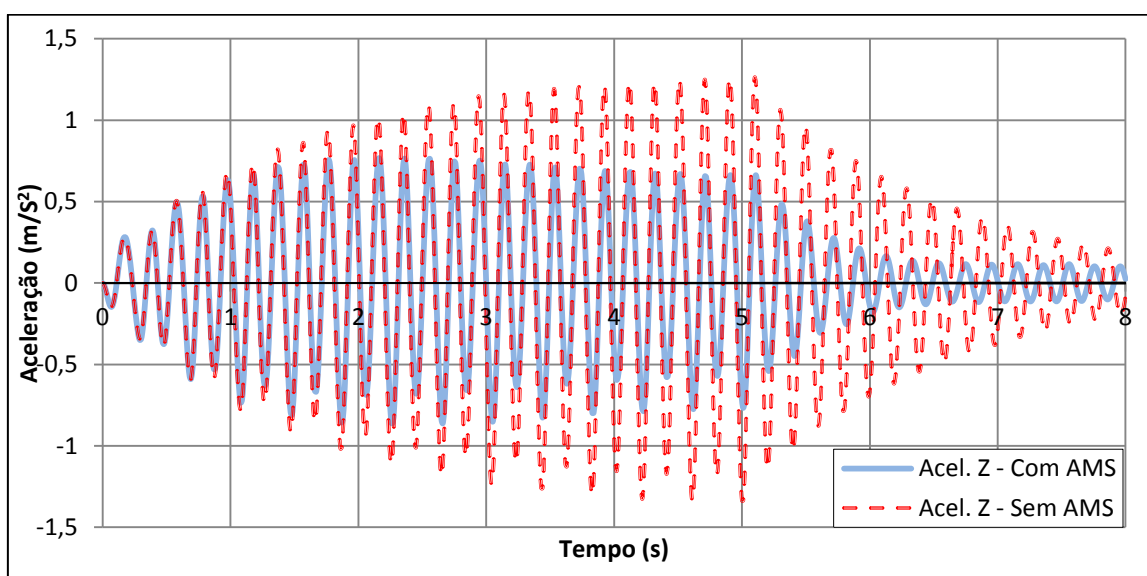


Figura 7.95 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,10Hz e $\mu=0,0005$

Tabela 7.36 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sétima frequência e $\mu=0,00025$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,650	36,579	1,336	0,862	35,480
<i>RMS</i>	0,444	0,306	31,131	0,429	0,288	32,959
VDV*	0,783	0,524	33,106	0,752	0,492	34,539

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

7.5.11. Estudo 11 – Sintonização de quatro AMS, sendo dois com a sexta e dois com a sétima frequências naturais ($f_6 = 5,07\text{Hz}$ e $f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$

O décimo primeiro estudo apresenta uma variação de distribuição dos AMS em relação aos demais realizados até então. Nessa proposta é realizada a sintonização de quatro amortecedores, sendo dois próximos a sexta e dois considerando a sétima frequência natural do sistema, $f_6 = 5,07\text{Hz}$ e $f_7 = 5,12\text{Hz}$. Os dispositivos são instalados próximos ao ponto de maior amplitude modal do sexto e sétimo modos, um degrau acima e um abaixo do nó que coincide com o segundo ponto, local onde se realiza as medidas de aceleração. Face à simetria das arquibancadas, são instalados dois dispositivos de cada um de seus lados, fazendo a simetria também dos atenuadores. A locação dos amortecedores pode ser visualizada através da figura 7.96.

O dimensionamento dos amortecedores também é realizado através do método de Bakre e Jangid (2006), conforme as equações 3.7 a 3.9 e 3.11 a 3.13 e tem seus resultados otimizados apresentados na tabela 7.37.

Tabela 7.37 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e 5,12Hz, com $\mu = 0,0005$

Parâmetro / Frequência	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{\text{ótimo}}$ (%)	f_i (Hz)	k_i (KN/m)	ϵ_i (%)	c_i KN*S/m
5,07Hz	8247,910	0,0125	1,031	1,000	5,069	1045,803	0,559	0,367
5,12Hz	8247,910	0,0125	1,031	1,000	5,119	1066,532	0,559	0,371

As figuras 7.98 e 7.99 apresentam a comparação das respostas em termos de acelerações para o segundo ponto e frequência de excitação igual a 2,55Hz para a estrutura com controle e sem controle. Os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.38. Este modelo apresenta um resultado parecido com os obtidos para a utilização de dois AMS e $\mu = 0,0005$.

O espectro de acelerações pode ser visualizado na figura 7.97 e apresenta redução no pico de cerca de 50% em relação à estrutura sem os amortecedores.

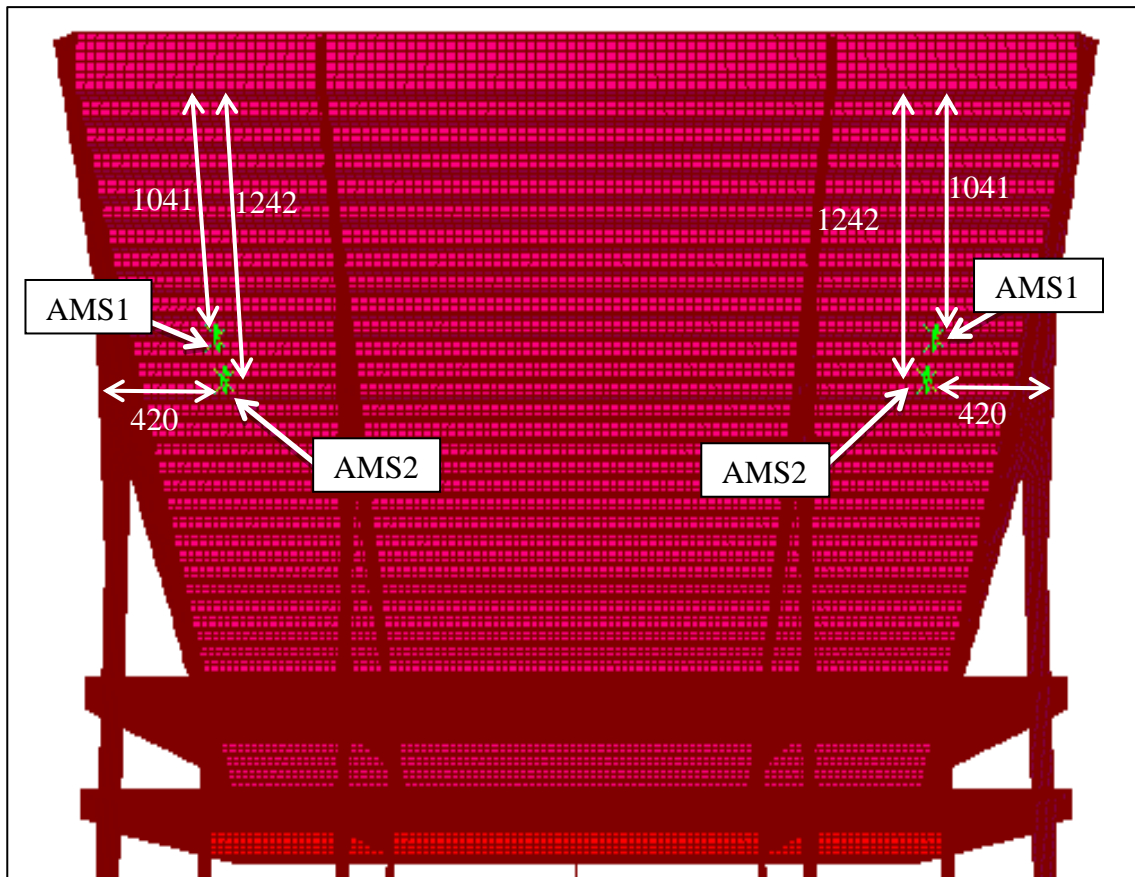


Figura 7.96 – Localização dos AMS para os estudos 11 e 12

Para a localização dos AMS apresentado na figura 7.96 são adotadas medidas em centímetros. As distâncias são apresentadas para o plano inclinado da arquibancada, iniciando nas faces externas do último degrau e dos pilares laterais até o centro do dispositivo de atenuação.

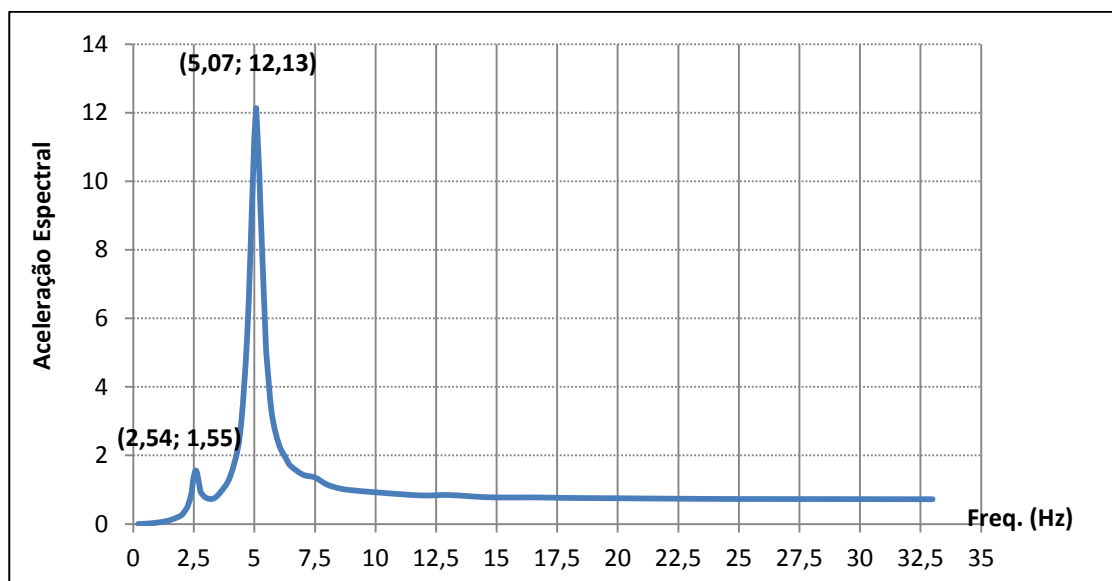


Figura 7.97 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e 5,12Hz e $\mu=0,0005$

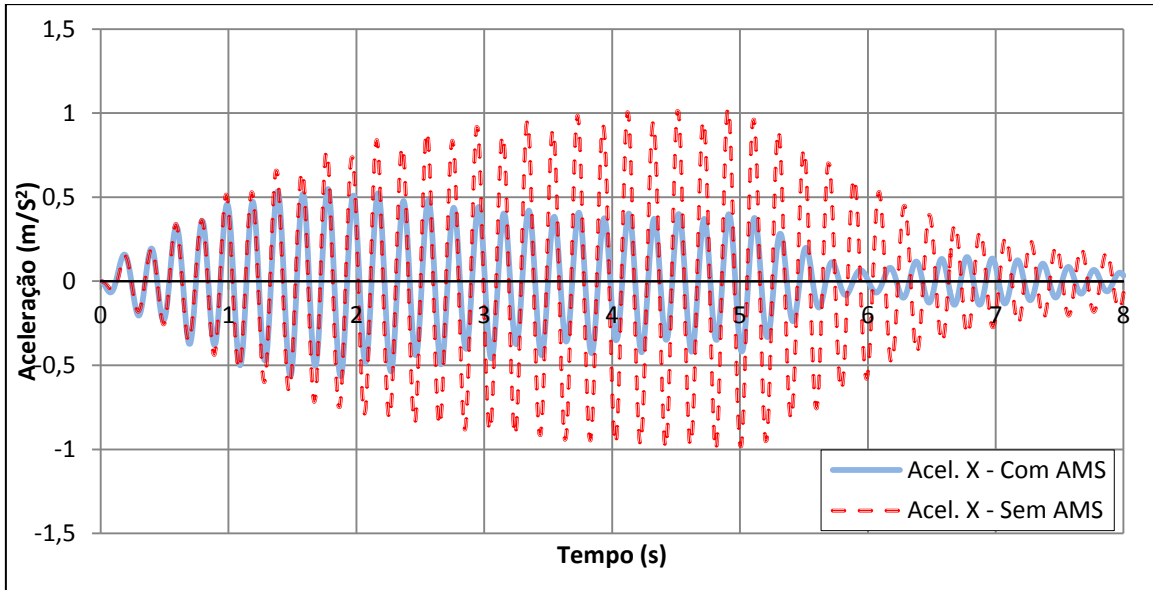


Figura 7.98 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz; 5,12Hz e $\mu=0,0005$

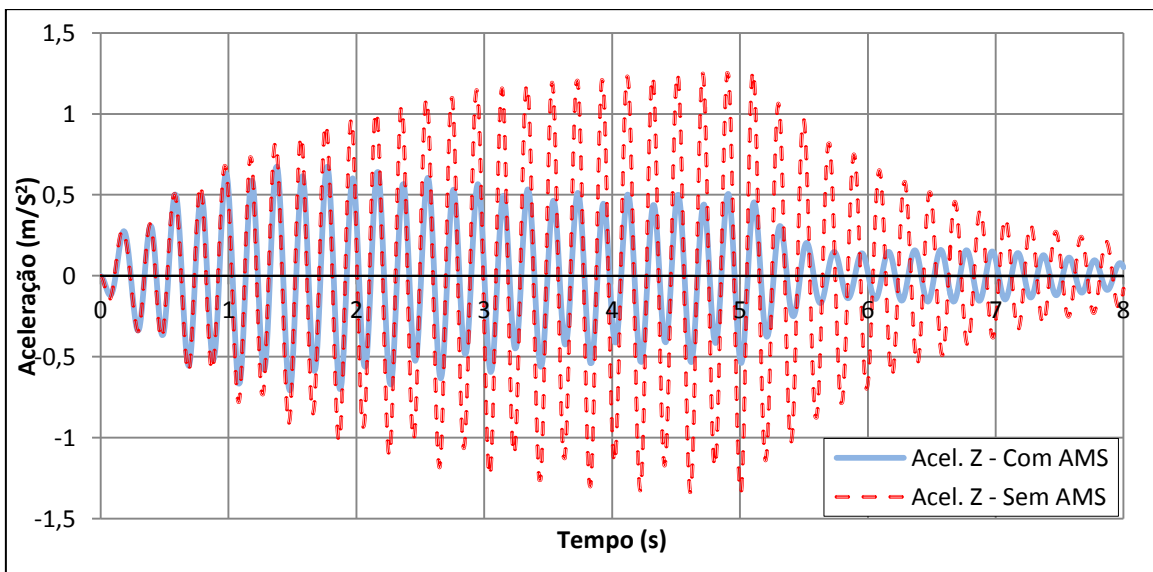


Figura 7.99 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz; 5,12Hz e $\mu=0,0005$

Tabela 7.38 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta e sétima frequências e $\mu=0,0005$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,565	44,935	1,336	0,708	47,021
RMS	0,444	0,239	46,202	0,429	0,226	47,312
VDV*	0,783	0,412	47,396	0,752	0,388	48,466

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

7.5.12. Estudo 12 – Sintonização de quatro AMS, sendo dois com a sexta e dois com a sétima frequências naturais ($f_6 = 5,07\text{Hz}$ e $f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$

O décimo segundo estudo é semelhante ao realizado no caso anterior, porém, com a massa dos amortecedores reduzida em 50%.

O dimensionamento dos amortecedores é feito segundo o método de Bakre e Jangid (2006), equações 3.7 a 3.9 e 3.11 a 3.13. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.39

Tabela 7.39 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e 5,12Hz e $\mu = 0,00025$

Parâmetro / Frequência	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f_i (Hz)	k_i (KN/m)	ε_i (%)	c_i KN*S/m
5,07Hz	8247,910	0,00625	0,515	1,000	5,069	522,985	0,559	0,130
5,12Hz	8247,910	0,00625	0,515	1,000	5,119	533,351	0,395	0,131

As figuras 7.101 e 7.102 apresentam a comparação das respostas em termos de acelerações para o segundo ponto e frequência de excitação igual a 2,55Hz para a estrutura com controle e sem controle. Os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.40. Este modelo apresenta resultado parecido com os obtidos para a utilização de 2 AMS, $\mu = 0,00025$ e sintonização dos dispositivos para a sexta frequência natural da estrutura.

O espectro de acelerações é mostrado na figura 7.100 e apresenta redução no pico de cerca de 35% em relação à estrutura sem os AMS, explicando o resultado obtido.

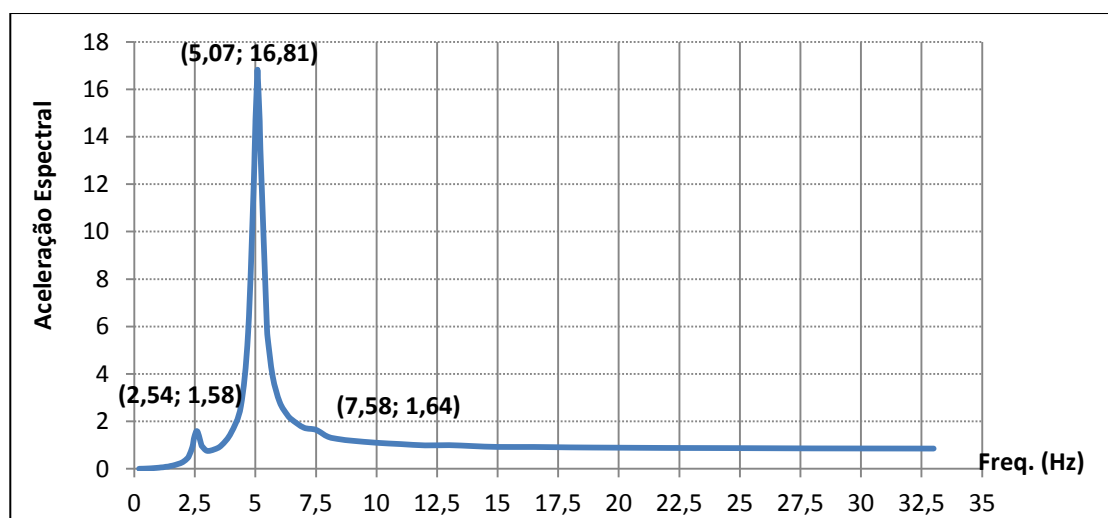


Figura 7.100 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz e 5,12Hz e $\mu=0,00025$

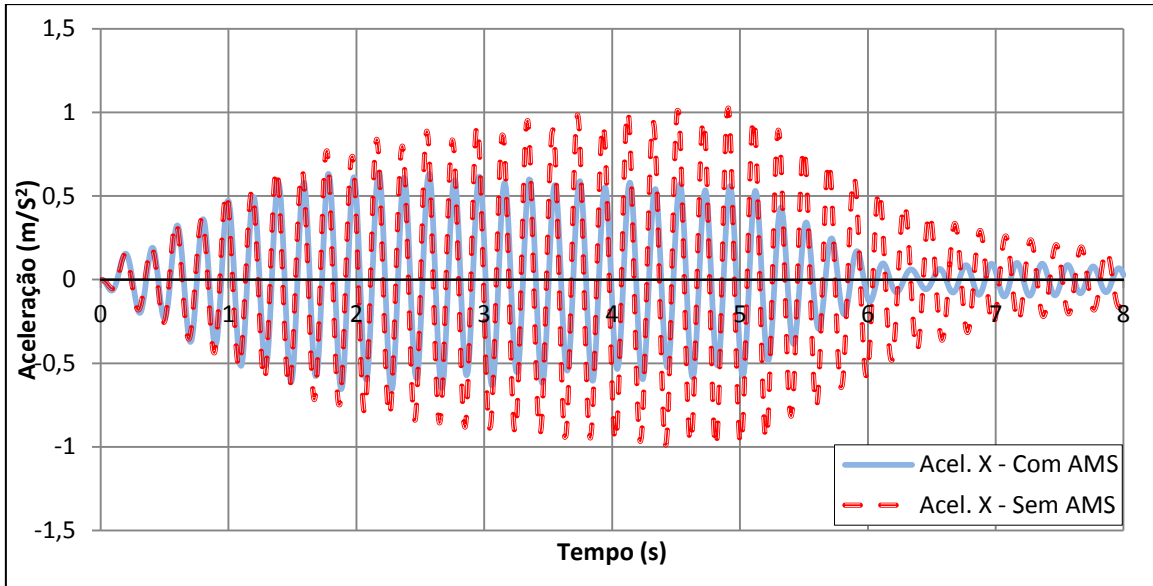


Figura 7.101 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz; 5,12Hz e $\mu=0,00025$

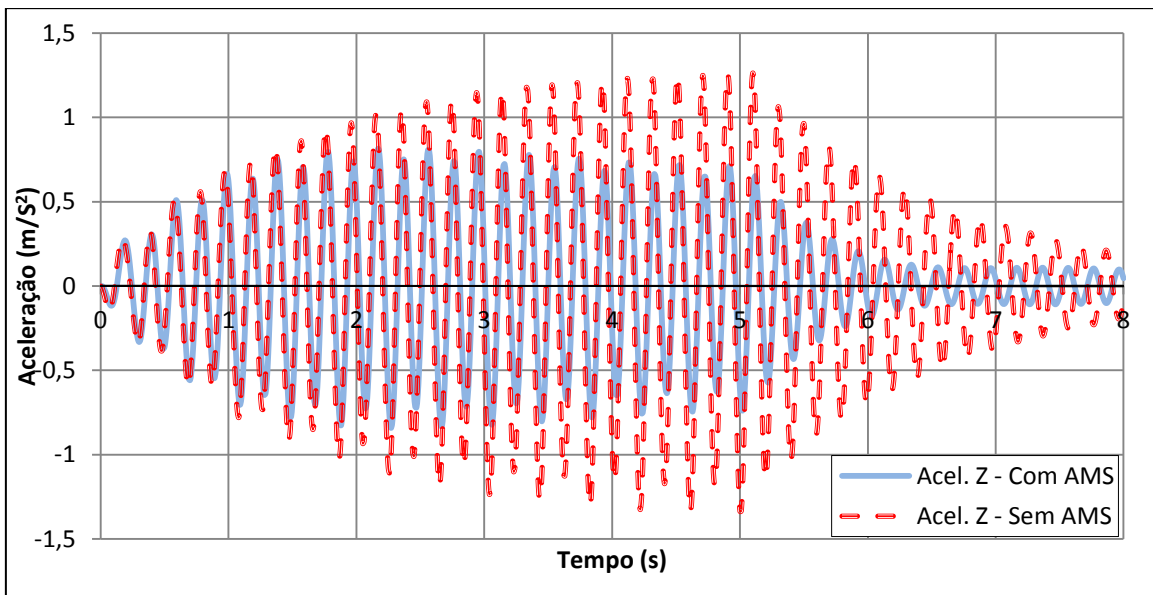


Figura 7.102 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMS sintonizados próximos a 5,07Hz; 5,12Hz e $\mu=0,0005$

Tabela 7.40 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMS considerando a sexta e sétima frequências e $\mu=0,00025$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,654	36,153	1,336	0,842	37,010
RMS	0,444	0,305	31,395	0,429	0,292	31,908
VDV*	0,783	0,523	33,182	0,752	0,499	33,691

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

7.5.13. Estudo 13 – Sintonização de quatro AMSM considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$

O décimo terceiro estudo apresenta a sintonização de quatro AMSM considerando a sexta frequência natural da estrutura, cujo valor é de 5,07Hz. Assim como no modelo anterior, os dispositivos são instalados próximos ao ponto de maior amplitude modal do sexto modo, um degrau acima e um abaixo do nó que coincide com o segundo ponto, local onde se realiza as medidas de aceleração. Também aqui é feita a simetria na instalação dos dispositivos atenuadores. A figura 7.103 apresenta a locação dos AMSM.

Para o dimensionamento dos amortecedores também é aplicado o método de Jangid (1999), porém, para AMSM. Dessa forma são adotadas as equações 3.14, a 3.22 apresentadas no capítulo 3.

A tabela 7.41 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros otimizados dos amortecedores:

Tabela 7.41 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,0005$

Parâmetro / AMSM	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f_i (Hz)	k_i (KN/m)	ε_i (%)	c_i KN*S/m
1	8247,910	0,0128	1,055	0,988	5,010	1045,107	0,591	0,392
2	8247,910	0,0126	1,039	0,996	5,048	1045,107	0,591	0,389
3	8247,910	0,0124	1,023	1,003	5,087	1045,107	0,591	0,386
4	8247,910	0,0122	1,007	1,011	5,126	1045,107	0,591	0,383

As figuras 7.105 e 7.106 mostram a comparação das respostas em termos de acelerações para o ponto 2 e frequência de excitação igual a 2,55Hz para a estrutura com controle e sem controle. Os valores de aceleração de pico, RMS e VDV para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.42. Já o espectro de acelerações para o sentido vertical do ponto 2 pode ser conferido na figura 7.104 e apresenta redução no pico de cerca de 50%. O modelo apresenta ganho de eficiência quando comparado à maioria dos estudos realizados com $\mu = 0,0005$, só não conseguindo superar a quinta proposta apresentada.

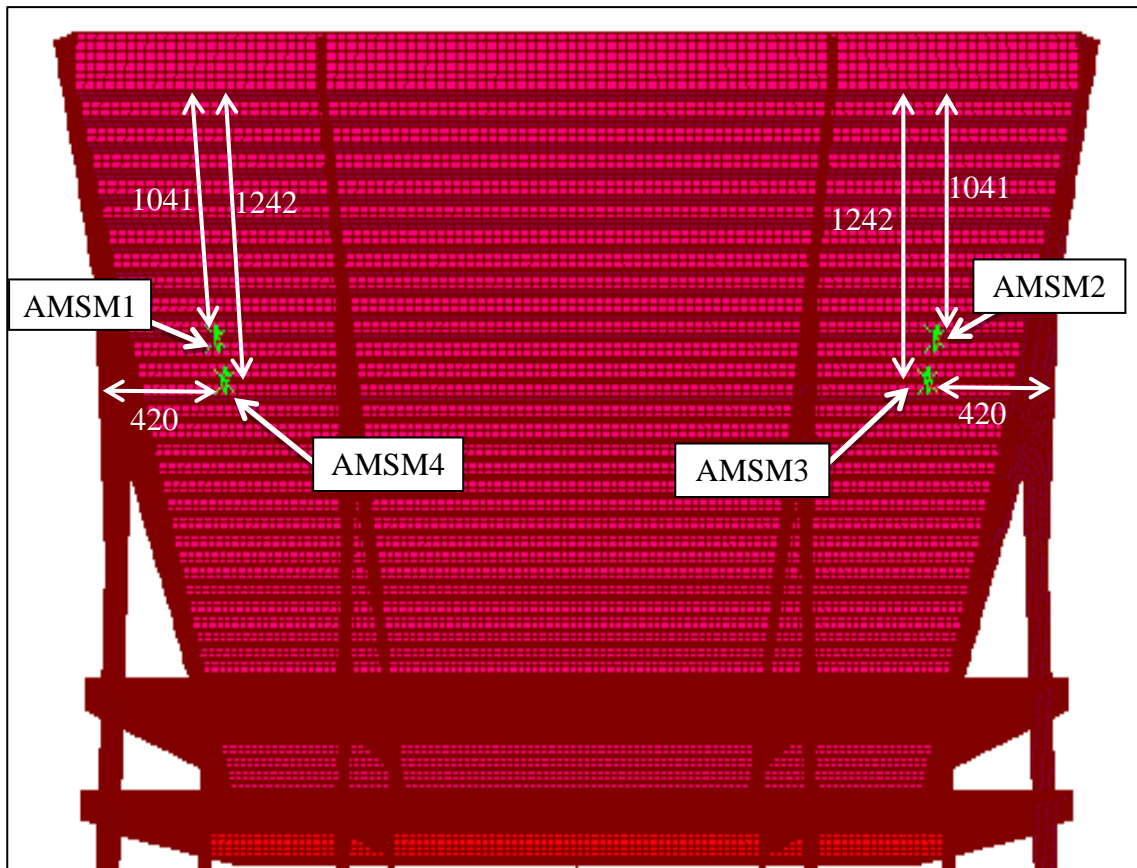


Figura 7.103 – Locação dos AMSM para os estudos 13 a 16

Para a locação dos AMSM apresentado na figura 7.103 são adotadas medidas em centímetros. As distâncias são apresentadas para o plano inclinado da arquibancada, iniciando nas faces externas do último degrau e dos pilares laterais até o centro do dispositivo de atenuação.

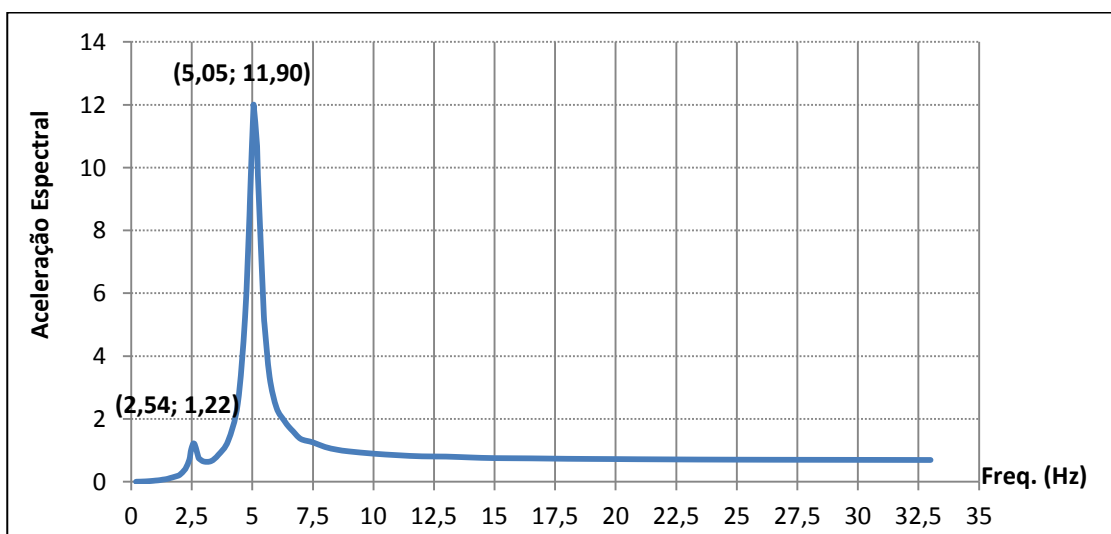


Figura 7.104 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$

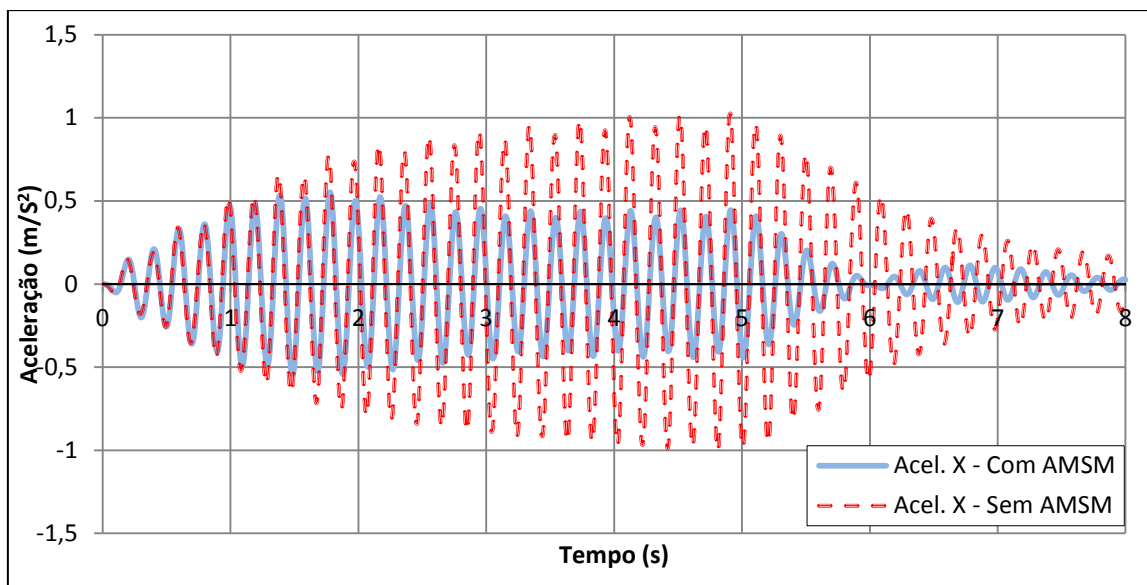


Figura 7.105 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz $\mu=0,0005$

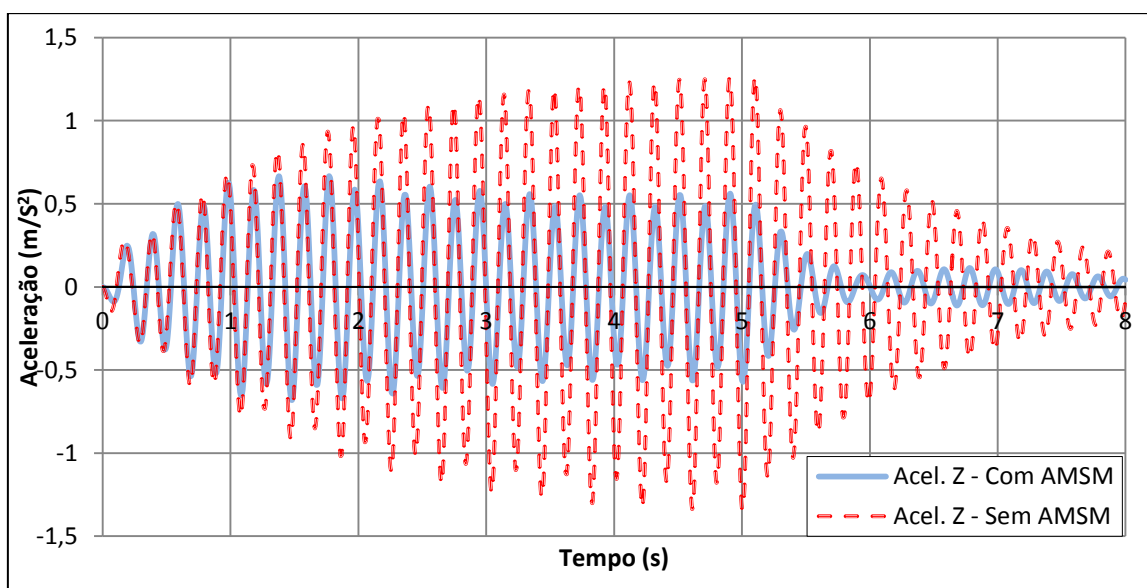


Figura 7.106 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,0005$

Tabela 7.42 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMSM considerando a sexta frequência e $\mu=0,0005$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,552	46,140	1,336	0,681	48,984
RMS	0,444	0,245	44,808	0,429	0,229	46,508
VDV*	0,783	0,419	46,458	0,752	0,390	48,093

* As acelerações em VDV são expressas em m/s^{1,75}

7.5.14. Estudo 14 – Sintonização de quatro AMSM considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,0005$

O décimo quarto estudo é similar ao apresentado anteriormente e apresenta como alteração a sintonização dos dispositivos considerando a sétima frequência natural da estrutura, cuja frequência natural é igual a 5,12Hz..

O dimensionamento dos amortecedores é feito pelo método de Jangid (1999) para AMSM e são adotadas as mesmas equações utilizadas no estudo anterior, ou seja, 3.14 a 3.22, apresentadas no capítulo 3. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.43.

Tabela 7.43 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,0005$

Parâmetro / AMSM	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f_i (Hz)	k_i (KN/m)	ε_i (%)	c_i KN*S/m
1	8247,910	0,0128	1,055	0,988	5,059	1065,822	0,591	0,396
2	8247,910	0,0126	1,039	0,996	5,098	1065,822	0,591	0,393
3	8247,910	0,0124	1,023	1,003	5,137	1065,822	0,591	0,390
4	8247,910	0,0122	1,007	1,011	5,177	1065,822	0,591	0,387

A comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com controle e sem controle pode ser verificada nas figuras 7.108 e 7.109. Já os valores de aceleração de pico, *RMS* e *VDV* para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.44. Esse apresenta redução de eficiência quando comparado à proposta anterior, que utiliza massas semelhantes, mas são sintonizados próximos à sexta frequência. No entanto, as respostas em termos de acelerações ainda se encontram dentro dos limites aceitáveis.

O espectro de acelerações pode ser visualizado na figura 7.107 e apresenta redução no pico de mais de 40% em relação à estrutura sem os amortecedores.

Tabela 7.44 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMSM considerando a sétima frequência e $\mu=0,0005$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,587	42,791	1,336	0,715	46,487
<i>RMS</i>	0,444	0,261	41,241	0,429	0,242	43,662
<i>VDV</i> *	0,783	0,447	42,913	0,752	0,412	45,198

* As acelerações em *VDV* são expressas em m/s^{1,75}

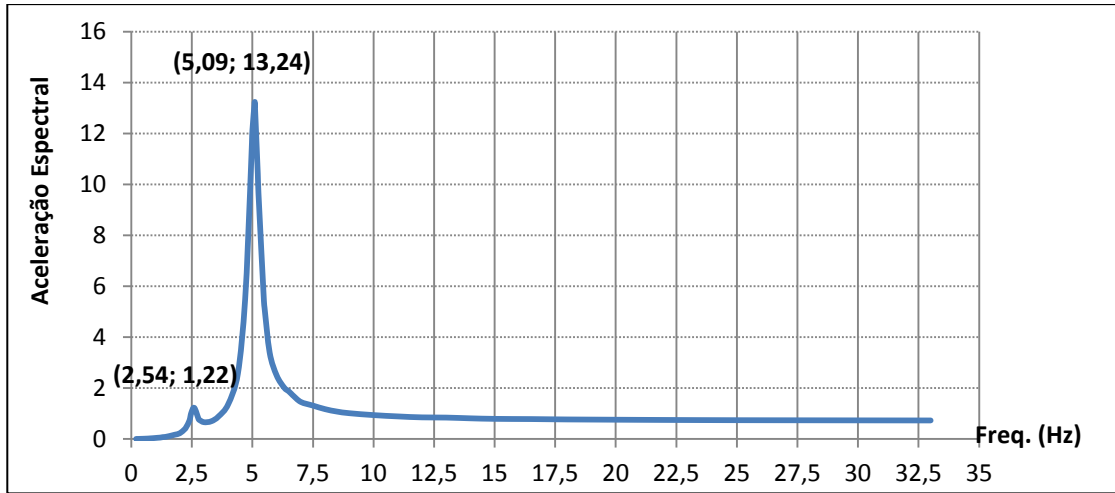


Figura 7.107 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$

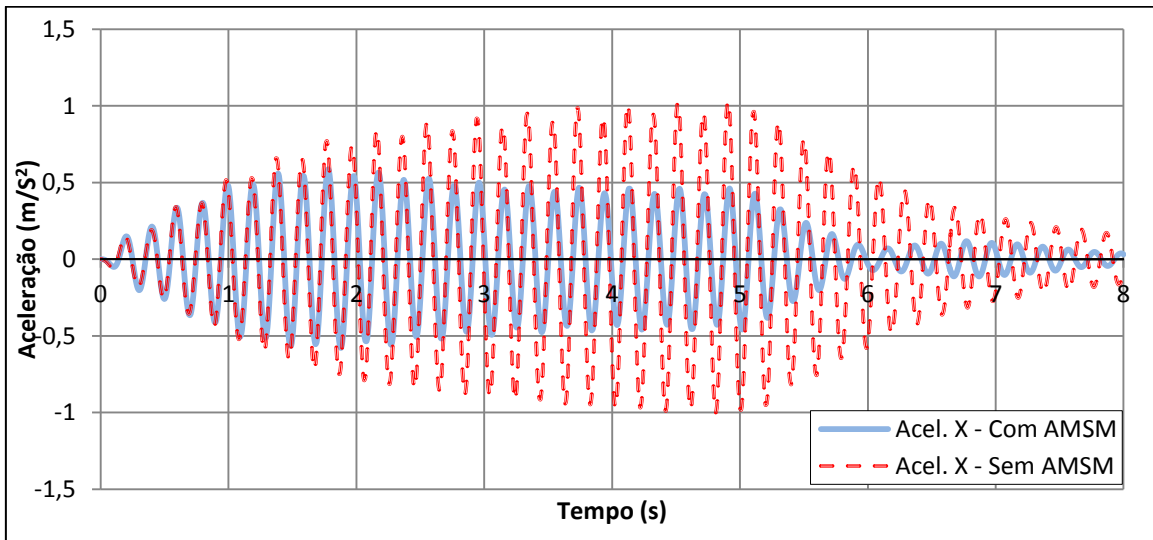


Figura 7.108 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$

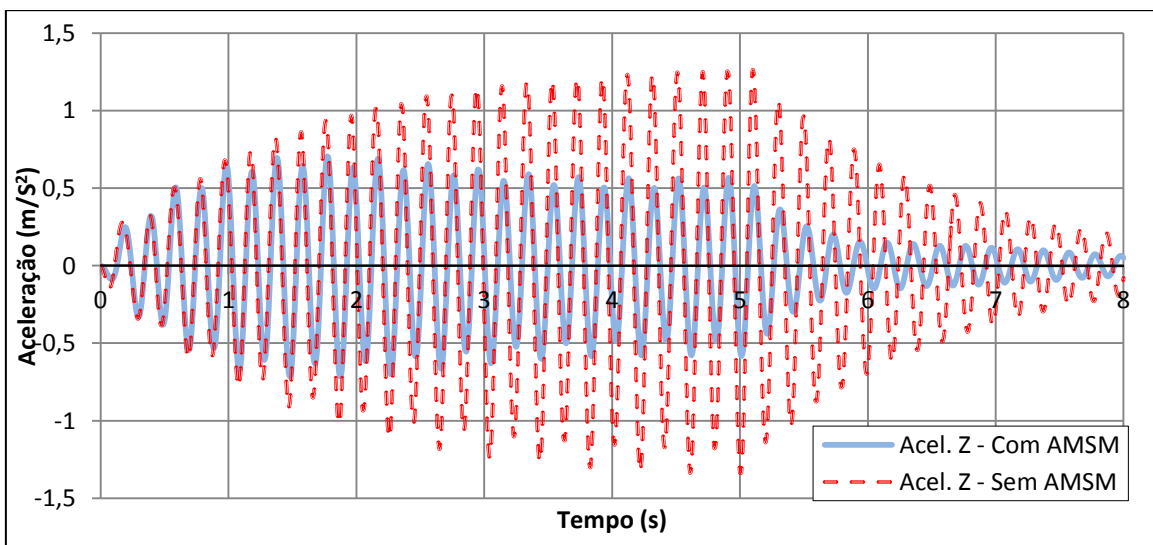


Figura 7.109 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,0005$

7.5.15. Estudo 15 – Sintonização de quatro AMSM considerando a sexta frequência natural ($f_6 = 5,07\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$

O décimo quinto estudo é similar ao desenvolvido no décimo terceiro, com os AMSM sintonizados próximos à 5,07Hz. A diferença ocorre na alteração da massa dos AMSM, que recebem apenas 50% do valor inserido naquele estudo.

O dimensionamento dos amortecedores é feito pelo método de Jangid (1999) para AMSM, conforme equações 3.14 a 3.22. Os resultados obtidos para os parâmetros otimizados são apresentados na tabela 7.45.

Tabela 7.45 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu = 0,00025$

Parâmetro / AMSM	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f_i (Hz)	k_i (KN/m)	ϵ_i (%)	c_i KN*S/m
1	8247,910	0,0064	0,524	0,992	5,028	522,829	0,418	0,138
2	8247,910	0,0063	0,518	0,997	5,055	522,829	0,418	0,138
3	8247,910	0,0062	0,513	1,002	5,083	522,829	0,418	0,137
4	8247,910	0,0061	0,507	1,008	5,110	522,829	0,418	0,136

As figuras 7.111 e 7.112 apresentam as comparações das acelerações nos eixos vertical e radial para a arquibancada com e sem o controle. Os valores de aceleração de pico, *RMS* e *VDV* para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.46. Esse modelo possui eficiência similar a outros modelos que adotam massa de duas toneladas, e apresenta respostas de acelerações dentro dos limites aceitáveis.

O espectro de acelerações pode ser visualizado na figura 7.110 e apresenta redução no pico de aproximadamente 40% em relação à estrutura sem os amortecedores.

Tabela 7.46 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMSM considerando a sexta frequência e $\mu=0,00025$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,640	37,592	1,336	0,815	38,998
<i>RMS</i>	0,444	0,304	31,421	0,429	0,289	32,522
<i>VDV</i> *	0,783	0,522	33,351	0,752	0,493	34,381

* As acelerações em *VDV* são expressas em m/s^{1,75}

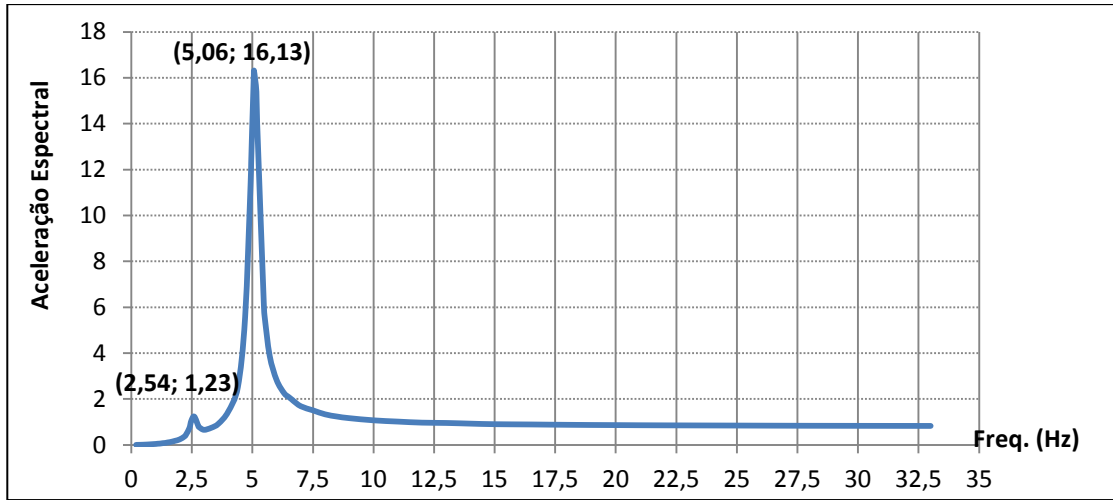


Figura 7.110 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$

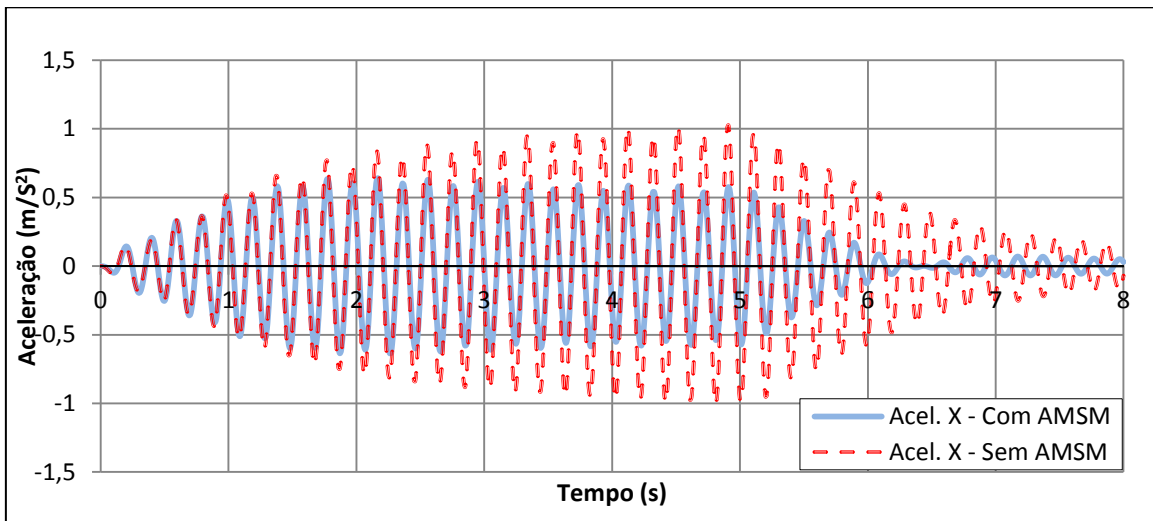


Figura 7.111 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz $\mu=0,00025$

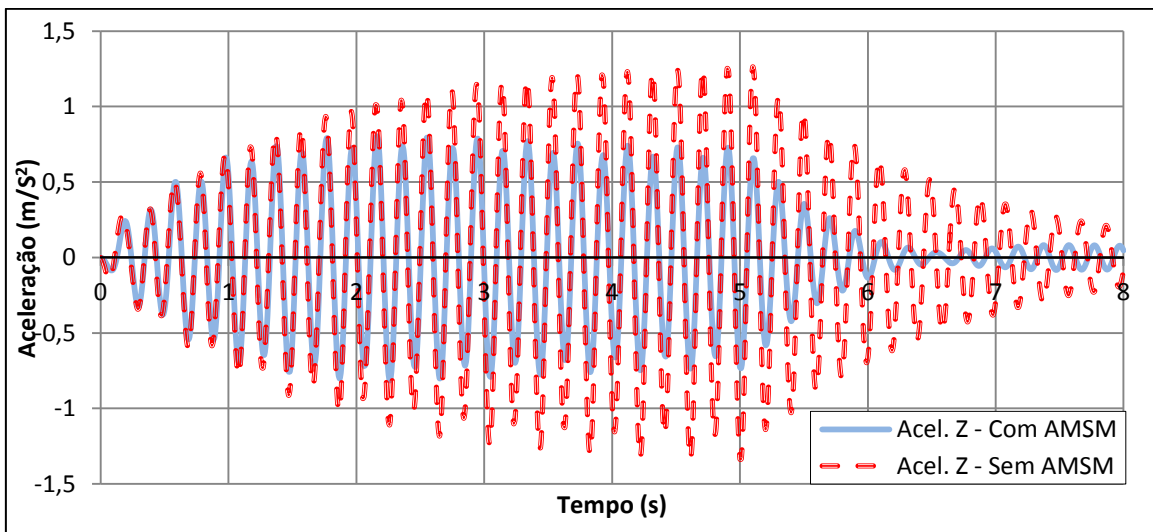


Figura 7.112 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMSM sintonizados próximos a 5,07Hz e $\mu=0,00025$

7.5.16. Estudo 16 – Sintonização de quatro AMSM considerando a sétima frequência natural ($f_7 = 5,12\text{Hz}$) e $\mu=0,00025$

O décimo sexto estudo é similar ao desenvolvido no décimo quarto, onde os AMSM são sintonizados próximos à frequência de 5,12Hz. A diferença ocorre na alteração da massa dos AMSM, que recebem apenas 50% do valor inserido naquele estudo.

O dimensionamento dos amortecedores é feito pelo método de Jangid (1999) para AMSM, conforme equações 3.14 a 3.22 apresentadas no terceiro capítulo. Os resultados obtidos para os parâmetros otimizados são apresentados na tabela 7.47.

Tabela 7.47 – Parâmetros otimizados para cada um dos AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu = 0,00025$

Parâmetro / AMSM	M (KN*S ² /m)	μ (%)	m (KN*S ² /m)	$\alpha_{ótimo}$ (%)	f_i (Hz)	k_i (KN/m)	ϵ_i (%)	c_i KN*S/m
1	8247,910	0,0064	0,524	0,992	5,077	533,192	0,418	0,140
2	8247,910	0,0063	0,518	0,997	5,105	533,192	0,418	0,139
3	8247,910	0,0062	0,513	1,002	5,133	533,192	0,418	0,138
4	8247,910	0,0061	0,507	1,008	5,160	533,192	0,418	0,138

A comparação das respostas em termos de acelerações para a estrutura com controle e sem controle pode ser verificada nas figuras 7.114 e 7.115. Já os valores de aceleração de pico e *RMS* para ambos os modelos são mostrados na tabela 7.48. Esse modelo é o que apresenta a menor redução das acelerações dentre as propostas apresentadas, mas ainda apresenta respostas de acelerações dentro dos limites aceitáveis.

O espectro de acelerações pode ser visualizado na figura 7.113 e apresenta redução no pico de cerca de 35% em relação à estrutura sem os amortecedores.

Tabela 7.48 – Comparação das acelerações para sintonização dos AMSM considerando a sétima frequência e $\mu=0,00025$

Tipo	a_x (m/s ²)			a_z (m/s ²)		
	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)	Não amortecido	Amortecido	Redução (%)
Pico	1,025	0,670	34,600	1,336	0,851	36,302
<i>RMS</i>	0,444	0,320	27,868	0,429	0,303	29,465
VDV*	0,783	0,550	29,774	0,752	0,517	31,274

* As acelerações em VDV são expressas em $\text{m/s}^{1,75}$

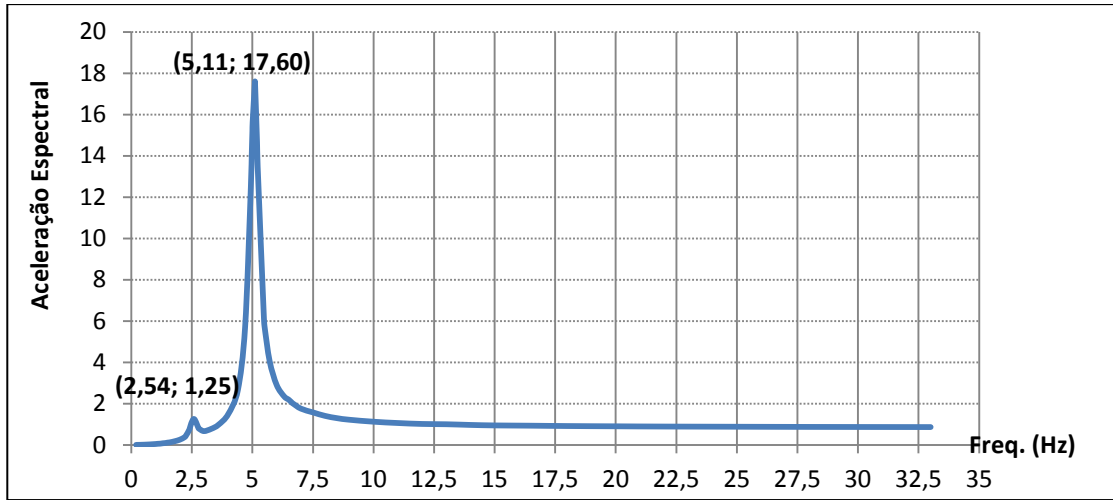


Figura 7.113 – Espectro de acelerações verticais do ponto 2 com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$

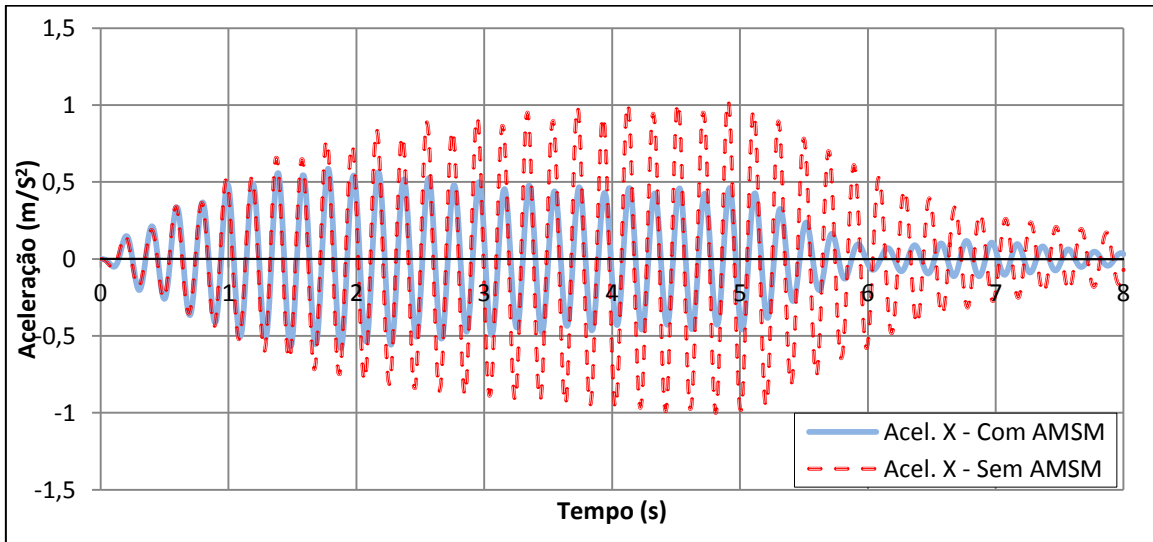


Figura 7.114 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo X com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$

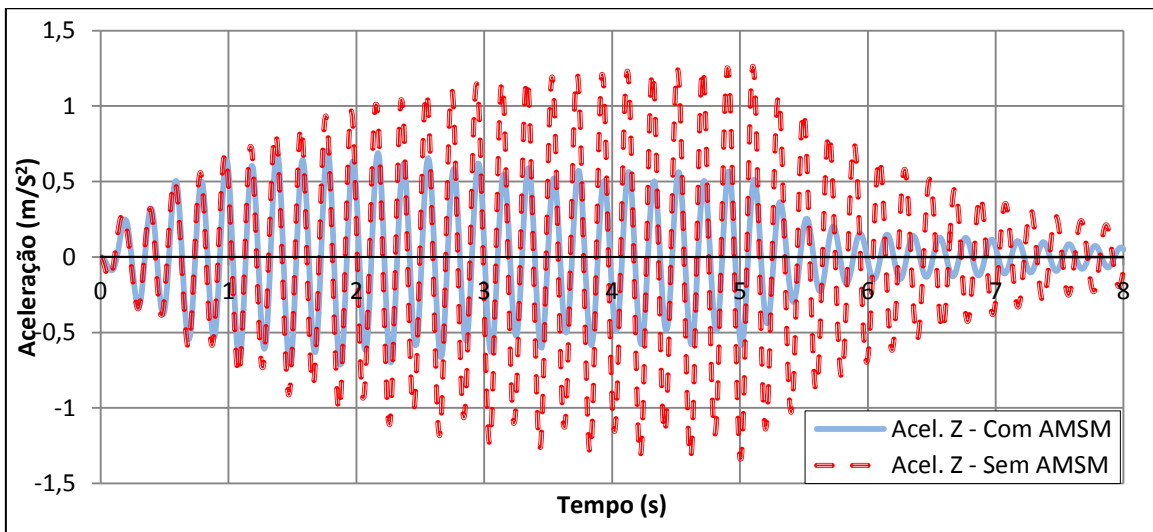


Figura 7.115 – Comparação entre as acelerações em função do tempo para o eixo Z com os AMSM sintonizados próximos a 5,12Hz e $\mu=0,00025$

De modo geral, o estudo de atenuação das vibrações apresenta uma boa alternativa para a melhoria do conforto na arquibancada, seja pelo emprego dos AMS ou dos AMSM. Na seção 7.7 é apresentada a verificação das acelerações resultantes levando em conta 16 propostas estudadas e então, feita a escolha daquela que melhor se adequa às necessidades da estrutura.

7.6. MODELO PROPOSTO PARA OS AMS E AMSM OBTIDOS

Existem atualmente diversos modelos de AMS aplicados nas mais distintas estruturas existentes, tais como pisos, arquibancadas, passarelas, pontes e viadutos de grandes vãos, prédios altos e outras. No Brasil seu uso ainda é pouco difundido, e, dentre as estruturas que os utilizam, a do estádio do Mineirão é talvez a mais conhecida. Conforme já relatado, o estádio necessitou passar por reforma para atender aos requisitos da FIFA para a realização da Copa do Mundo no Brasil, em 2014. A figura 7.116 apresenta o modelo dos dispositivos utilizados no estádio mineiro.



Figura 7.116 – AMS utilizados no Mineirão, Belo Horizonte

http://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/uploads/2014/06/amortecedor_mineirao.jpg acesso em 11 de abril de 2016.

Apesar de já ser aplicado em grandes obras de engenharia, os AMS e AMSM ainda são dispositivos bastante desconhecidos para boa parte dos engenheiros civis. O projeto

completo de um AMS e a maneira correta de fixá-lo na estrutura é algo que demanda estudos e ensaios de laboratório, porém, seu funcionamento não é complicado de entender. Dessa forma, a título de ilustração, apresenta-se na figura 7.117 um esboço dos dispositivos obtidos nas propostas de atenuação apresentadas. As características dos elementos dos amortecedores podem ser visualizadas na tabela 7.49.

É importante ressaltar que o modelo apresenta seis conjuntos de molas e amortecedores, motivo pelo qual os valores dos parâmetros dos elementos é de apenas um sexto daqueles obtidos em cada proposta. A massa dos dispositivos é obtida através da inserção de chapas de aço de seção transversal idêntica e altura variável, unidas através de seis parafusos, conforme pode ser observado. Desta forma a montagem e a manutenção ficam simplificadas, tendo em vista que as chapas podem ser carregadas por apenas uma pessoa. Ainda com relação à seção das chapas, sua escolha se deu em função da largura da arquibancada, de forma que todo o elemento atenuador ficasse confinado dentro da largura da peça pré-moldada da arquibancada. Já a fixação dos AMS na estrutura é feita a partir da ancoragem de parafusos no concreto da parte inferior da laje da arquibancada.

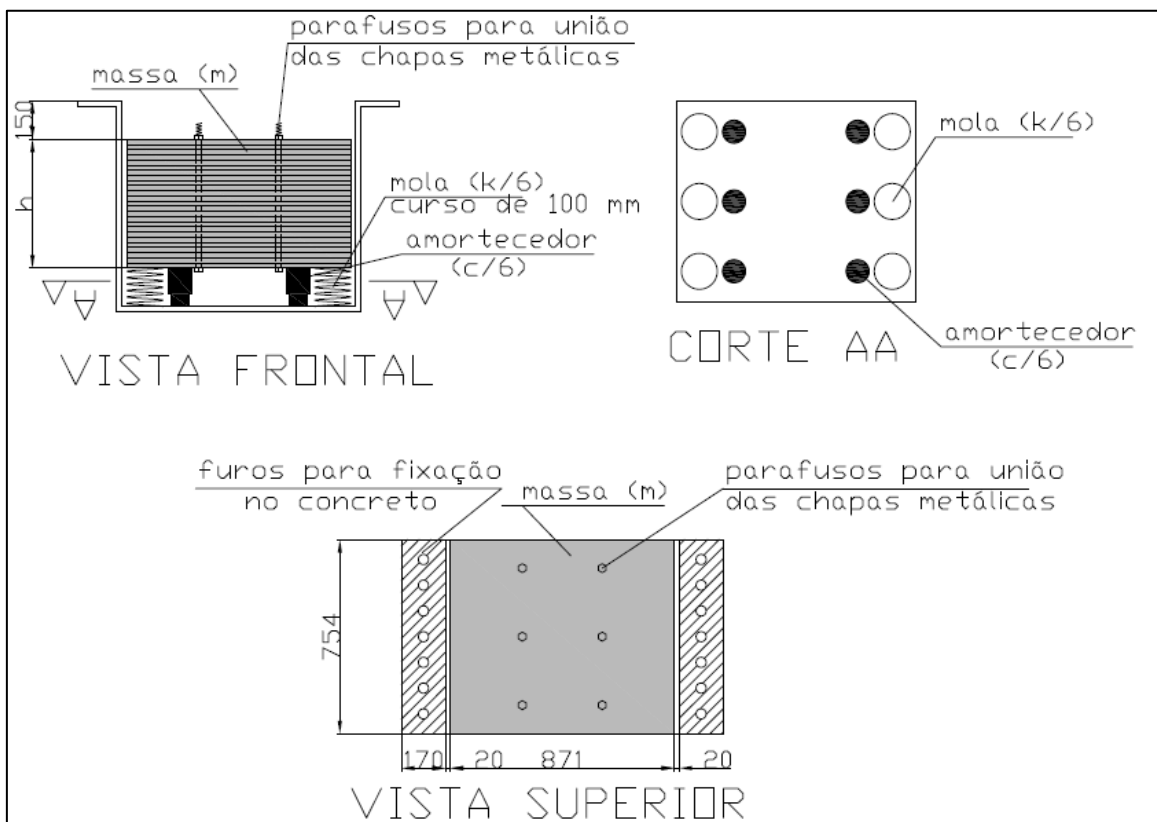


Figura 7.117 – Croquis dos AMS e AMSM propostos

Tabela 7.49 – Características dos Amortecedores

Estado	AMS	m (KN*S ² /m)	k/6 (KN/m)	c/6 KN*S/m	Altura total h (mm)
1	1	4,124	664,049	0,478	799,9
2	1	4,124	696,653	0,489	799,9
3	1	4,124	710,462	0,494	799,9
4	1	4,124	704,922	0,492	799,9
5	1	2,062	348,503	0,173	400,0
6	1	2,062	355,411	0,175	400,0
7	1	2,062	352,640	0,174	400,0
8	1	1,031	174,301	0,061	200,0
9	1	1,031	177,755	0,062	200,0
10	1	1,031	176,369	0,062	200,0
11	1	1,031	174,300	0,061	200,0
	2	1,031	177,755	0,062	200,0
12	1	0,515	87,164	0,022	99,9
	2	0,515	88,819	0,022	99,9
13	1	1,055	174,185	0,065	204,6
	2	1,039	174,185	0,065	201,5
	3	1,023	174,185	0,064	198,4
	4	1,007	174,185	0,064	195,3
14	1	1,055	177,637	0,066	204,6
	2	1,039	177,637	0,066	201,5
	3	1,023	177,637	0,066	198,4
	4	1,007	177,637	0,066	195,3
15	1	0,524	87,138	0,023	101,6
	2	0,518	87,138	0,023	100,5
	3	0,513	87,138	0,023	99,5
	4	0,507	87,138	0,023	98,3
16	1	0,524	88,865	0,023	101,6
	2	0,518	88,865	0,023	100,5
	3	0,513	88,865	0,023	99,5
	4	0,507	88,865	0,023	98,3

7.7. VERIFICAÇÃO DAS PROPOSTAS DE CONTROLE QUANTO AOS LIMITES DE VIBRAÇÃO

Esta seção consiste na apresentação dos resultados obtidos pela aplicação dos dispositivos de controle e verificação quanto à solução com menor massa que minimize as vibrações na estrutura. As tabelas 7.40 a 7.52 apresentam os resumos dos resultados obtidos em termos de aceleração de pico, *RMS* e em VDV, respectivamente, levando em conta o eixo de atuação, a massa dos amortecedores e a redução obtida:

Tabela 7.50 – Verificação das acelerações de pico para as propostas de controle estudadas

Proposta	Eixo	Massa (KN*S ² /m)	a _{pico} (m/s ²)	CEB 209 (1991)	Bachmann <i>et al</i> (1995)
1	Z	8,248	1,324	Desconfortável	Não aceitável
2	Z	8,248	0,976	Desconfortável	Aceitável
3	Z	8,248	0,621	Desconfortável	Aceitável
4	Z	8,248	0,640	Desconfortável	Aceitável
5	Z	4,124	0,715	Desconfortável	Aceitável
6	Z	4,124	0,775	Desconfortável	Aceitável
7	Z	4,124	0,738	Desconfortável	Aceitável
8	Z	2,062	0,836	Desconfortável	Aceitável
9	Z	2,062	0,889	Desconfortável	Aceitável
10	Z	2,062	0,862	Desconfortável	Aceitável
11	Z	4,124	0,708	Desconfortável	Aceitável
12	Z	2,062	0,842	Desconfortável	Aceitável
13	Z	4,124	0,681	Desconfortável	Aceitável
14	Z	4,124	0,715	Desconfortável	Aceitável
15	Z	2,062	0,815	Desconfortável	Aceitável
16	Z	2,062	0,851	Desconfortável	Aceitável

Tabela 7.51 – Verificação das acelerações em *RMS* para as propostas de controle estudadas

Proposta	Eixo	Massa (KN*S2/m)	a (m/s ²)	ISO 2631 (1985)	ISO 2631 (1997)
1	X	8,248	0,438	N.C.R*	N.C.R*
	Z		0,430	N.C.R*	N.C.R*
2	X	8,248	0,277	N.C.R*	Não desconfortável
	Z		0,249	Não desconfortável	Não desconfortável
3	X	8,248	0,195	Não desconfortável	Não desconfortável
	Z		0,178	Não desconfortável	Não desconfortável
4	X	8,248	0,163	Não desconfortável	Não desconfortável
	Z		0,184	Não desconfortável	Não desconfortável
5	X	4,124	0,234	Não desconfortável	Não desconfortável
	Z		0,216	Não desconfortável	Não desconfortável
6	X	4,124	0,251	N.C.R*	Não desconfortável
	Z		0,230	Não desconfortável	Não desconfortável
7	X	4,124	0,242	Não desconfortável	Não desconfortável
	Z		0,222	Não desconfortável	Não desconfortável
8	X	2,062	0,297	N.C.R*	Não desconfortável
	Z		0,280	Não desconfortável	Não desconfortável
9	X	2,062	0,315	N.C.R*	N.C.R*
	Z		0,296	Não desconfortável	Não desconfortável
10	X	2,062	0,306	N.C.R*	Não desconfortável
	Z		0,288	Não desconfortável	Não desconfortável
11	X	4,124	0,239	Não desconfortável	Não desconfortável
	Z		0,226	Não desconfortável	Não desconfortável
12	X	2,062	0,305	N.C.R*	Não desconfortável
	Z		0,292	Não desconfortável	Não desconfortável
13	X	4,124	0,245	Não desconfortável	Não desconfortável
	Z		0,229	Não desconfortável	Não desconfortável
14	X	4,124	0,261	N.C.R*	Não desconfortável
	Z		0,242	Não desconfortável	Não desconfortável
15	X	2,062	0,304	N.C.R*	Não desconfortável
	Z		0,289	Não desconfortável	Não desconfortável
16	X	2,062	0,320	N.C.R*	N.C.R*
	Z		0,303	Não desconfortável	Não desconfortável

N.C.R* => Nível de conforto reduzido

Tabela 7.52 – Verificação das acelerações em VDV para as propostas de controle estudadas

Proposta	Eixo	Massa (KN*S ² /m)	a (m/s ^{1,75})	Ellis e Littler (2004)	Setareh (2012)
1	Z	8,248	0,752	B.P.C.A*	Perturbador
2	Z	8,248	0,441	Aceitável	Aceitável
3	Z	8,248	0,310	Aceitável	Aceitável
4	Z	8,248	0,291	Aceitável	Aceitável
5	Z	4,124	0,372	Aceitável	Aceitável
6	Z	4,124	0,397	Aceitável	Aceitável
7	Z	4,124	0,384	Aceitável	Aceitável
8	Z	2,062	0,479	Aceitável	Aceitável
9	Z	2,062	0,506	Aceitável	Perturbador
10	Z	2,062	0,492	Aceitável	Aceitável
11	Z	4,124	0,388	Aceitável	Aceitável
12	Z	2,062	0,499	Aceitável	Aceitável
13	Z	4,124	0,390	Aceitável	Aceitável
14	Z	4,124	0,412	Aceitável	Aceitável
15	Z	2,062	0,493	Aceitável	Aceitável
16	Z	2,062	0,517	Aceitável	Perturbador

B.P.C.A*=> Baixa probabilidade de um comentário adverso

Das tabelas 7.49 a 7.51 podem ser observados os seguintes pontos:

- Nenhuma proposta foi suficiente para atender aos limites sugeridos pelo CEB 209 (1991), que sugere acelerações verticais de pico inferiores a $0,55\text{m/s}^2$. No entanto, o normativo aceita uma variação de até duas vezes esse limite, situação que coloca o ponto analisado em condições de aceitabilidade. Ressalta-se que, com essa consideração, os valores de aceleração de pico admissíveis aproximam-se da faixa proposta por Bachmann *et al* (1995), que é de $0,50$ a $1,00\text{m/s}^2$.
- Apesar de a quinta frequência natural da estrutura colaborar com a movimentação do ponto analisado, a inserção dos AMS no ponto de maior amplitude vertical do modo observado praticamente não alterou o resultado no ponto de análise, lembrando que as verificações foram feitas no meio do primeiro vão da arquibancada superior e o máximo deslocamento do quinto modo ocorre no canto superior da arquibancada.
- Para os estudos dos AMS com $\mu = 0,001$, os melhores resultados em termos de aceleração de pico e em *RMS* (aceleração vertical) foram obtidos para a terceira

proposta estudada, seguida pela quarta proposta e então pela segunda. Já com relação às acelerações em VDV e em *RMS* (aceleração radial), a ordem se altera um pouco, sendo a melhor solução a quarta proposta estudada, seguida pela terceira e então a segunda. A sintonização considerando a quinta frequência (primeira proposta), como anteriormente comentado, não trouxe benefícios consideráveis para a estrutura.

- Para os estudos dos AMS com $\mu = 0,0005$, o melhor resultado em termos de acelerações de pico foi obtido para a décima terceira proposta estudada, seguido pela décima primeira, décima quarta, quinta, sétima e sexta. Já com relação às acelerações em VDV e *RMS* (vertical), a quinta proposta é a que apresenta a maior eficiência, seguido pela sétima, décima primeira, décima terceira, sexta e décima quarta. Em relação às acelerações em *RMS* (horizontal) a ordem de eficiência foi praticamente a mesma obtida para as acelerações na direção vertical, sendo a melhor solução a quinta proposta estudada, seguida pela décima primeira, sétima, décima terceira, sexta e décima quarta.
- Para os estudos dos AMS com $\mu = 0,00025$, a maior eficiência em termos de aceleração de pico foi alcançada na décima quinta proposta estudada, seguido pela oitava, décima segunda, décima sexta, décima e nona. Em relação às acelerações em VDV e *RMS* (vertical) a oitava proposta apresentou os melhores resultados, seguido pela décima, décima quinta, décima segunda, nona e décima sexta. Em relação às acelerações no eixo horizontal a melhor proposta também é a oitava, seguida pela décima quinta, décima segunda, décima, nona e décima sexta.

No geral, dentre as propostas feitas, a oitava foi a que apresentou a maior redução das acelerações dentre os realizados com $\mu = 0,00025$. Uma vez que se pretende reduzir os esforços na análise estática sem prejuízo da análise dinâmica, opta-se pela escolha do oitavo estudo para a averiguação da estrutura nas demais situações de carregamento.

7.8. VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA COM OS AMS DA OITAVA PROPOSTA INSTALADOS PARA DIVERSAS SITUAÇÕES DE CARREGAMENTO

Esta seção apresenta a verificação das acelerações ocorrentes no segundo ponto de estudo (ponto crítico da arquibancada) para os quatro modelos de carregamento inicialmente estudados e as 15 frequências de carga adotadas em cada análise levando em conta a oitava proposta de controle. As tabelas 7.53 a 7.64 apresentam os resumos dos resultados

obtidos em termos de aceleração de pico, VDV e em *RMS*, levando em conta a frequência de carregamento, o eixo de atuação e a aceleração obtida:

Tabela 7.53 – Verificação das acelerações de pico para o MC1

Frequência	Eixo	a _{pico} (m/s ²)	CEB 209 (1991)	Bachmann <i>et al</i> (1995)
2,10	Z	0,357	Claramente perceptível	Aceitável
2,15	Z	0,456	Claramente perceptível	Aceitável
2,20	Z	0,511	Claramente perceptível	Aceitável
2,25	Z	0,594	Desconfortável	Aceitável
2,30	Z	0,681	Desconfortável	Aceitável
2,35	Z	0,825	Desconfortável	Aceitável
2,40	Z	0,958	Desconfortável	Aceitável
2,45	Z	0,793	Desconfortável	Aceitável
2,50	Z	0,610	Desconfortável	Aceitável
2,55	Z	0,700	Desconfortável	Aceitável
2,60	Z	0,604	Desconfortável	Aceitável
2,65	Z	0,475	Claramente perceptível	Aceitável
2,70	Z	0,374	Claramente perceptível	Aceitável
2,75	Z	0,285	Claramente perceptível	Aceitável
2,80	Z	0,418	Claramente perceptível	Aceitável

Tabela 7.54 – Verificação das acelerações em VDV para o MC1

Frequência	Eixo	a (m/s ^{1,75})	Ellis e Littler (2004)	Setareh (2012)
2,10	Z	0,170	Aceitável	Aceitável
2,15	Z	0,216	Aceitável	Aceitável
2,20	Z	0,254	Aceitável	Aceitável
2,25	Z	0,305	Aceitável	Aceitável
2,30	Z	0,371	Aceitável	Aceitável
2,35	Z	0,470	Aceitável	Aceitável
2,40	Z	0,535	Aceitável	Perturbador
2,45	Z	0,478	Aceitável	Aceitável
2,50	Z	0,190	Aceitável	Aceitável
2,55	Z	0,399	Aceitável	Aceitável
2,60	Z	0,337	Aceitável	Aceitável
2,65	Z	0,235	Aceitável	Aceitável
2,70	Z	0,178	Aceitável	Aceitável
2,75	Z	0,129	Aceitável	Aceitável
2,80	Z	0,150	Aceitável	Aceitável

B.P.C.A*=> Baixa probabilidade de um comentário adverso

Tabela 7.55 – Verificação das acelerações em *RMS* para o MC1

Proposta	Eixo	a (m/s ²)	ISO 2631 (1985)	ISO 2631 (1997)
2,10	Z	0,095	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,091	Não desconfortável	Não desconfortável
2,15	Z	0,123	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,118	Não desconfortável	Não desconfortável
2,20	Z	0,145	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,139	Não desconfortável	Não desconfortável
2,25	Z	0,176	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,167	Não desconfortável	Não desconfortável
2,30	Z	0,216	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,206	Não desconfortável	Não desconfortável
2,35	Z	0,274	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,263	N.C.R*	Não desconfortável
2,40	Z	0,310	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,301	N.C.R*	Não desconfortável
2,45	Z	0,279	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,278	N.C.R*	Não desconfortável
2,50	Z	0,108	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,103	Não desconfortável	Não desconfortável
2,55	Z	0,233	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,243	Não desconfortável	Não desconfortável
2,60	Z	0,195	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,213	Não desconfortável	Não desconfortável
2,65	Z	0,131	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,146	Não desconfortável	Não desconfortável
2,70	Z	0,098	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,109	Não desconfortável	Não desconfortável
2,75	Z	0,069	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,072	Não desconfortável	Não desconfortável
2,80	Z	0,075	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,072	Não desconfortável	Não desconfortável

N.C.R* => Nível de conforto reduzido

Tabela 7.56 – Verificação das acelerações de pico para o MC2

Frequência	Eixo	a _{pico} (m/s ²)	CEB 209 (1991)	Bachmann et al (1995)
2,10	Z	0,369	Claramente perceptível	Aceitável
2,15	Z	0,635	Desconfortável	Aceitável
2,20	Z	0,461	Claramente perceptível	Aceitável
2,25	Z	0,557	Desconfortável	Aceitável
2,30	Z	0,651	Desconfortável	Aceitável
2,35	Z	0,741	Desconfortável	Aceitável
2,40	Z	0,826	Desconfortável	Aceitável
2,45	Z	0,927	Desconfortável	Aceitável
2,50	Z	0,795	Desconfortável	Aceitável
2,55	Z	0,718	Desconfortável	Aceitável
2,60	Z	0,607	Desconfortável	Aceitável
2,65	Z	0,466	Claramente perceptível	Aceitável
2,70	Z	0,399	Claramente perceptível	Aceitável
2,75	Z	0,302	Claramente perceptível	Aceitável
2,80	Z	0,490	Claramente perceptível	Aceitável

Tabela 7.57 – Verificação das acelerações em VDV para o MC2

Frequência	Eixo	a (m/s ^{1,75})	Ellis e Littler (2004)	Setareh (2012)
2,10	Z	0,188	Aceitável	Aceitável
2,15	Z	0,210	Aceitável	Aceitável
2,20	Z	0,246	Aceitável	Aceitável
2,25	Z	0,302	Aceitável	Aceitável
2,30	Z	0,347	Aceitável	Aceitável
2,35	Z	0,394	Aceitável	Aceitável
2,40	Z	0,479	Aceitável	Aceitável
2,45	Z	0,542	Aceitável	Perturbador
2,50	Z	0,491	Aceitável	Aceitável
2,55	Z	0,403	Aceitável	Aceitável
2,60	Z	0,323	Aceitável	Aceitável
2,65	Z	0,224	Aceitável	Aceitável
2,70	Z	0,177	Aceitável	Aceitável
2,75	Z	0,138	Aceitável	Aceitável
2,80	Z	0,169	Aceitável	Aceitável

B.P.C.A*=> Baixa probabilidade de um comentário adverso

Tabela 7.58 – Verificação das acelerações em *RMS* para o MC2

Proposta	Eixo	a (m/s ²)	ISO 2631 (1985)	ISO 2631 (1997)
2,10	Z	0,110	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,099	Não desconfortável	Não desconfortável
2,15	Z	0,124	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,114	Não desconfortável	Não desconfortável
2,20	Z	0,143	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,134	Não desconfortável	Não desconfortável
2,25	Z	0,170	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,162	Não desconfortável	Não desconfortável
2,30	Z	0,194	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,183	Não desconfortável	Não desconfortável
2,35	Z	0,227	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,212	Não desconfortável	Não desconfortável
2,40	Z	0,280	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,264	N.C.R*	Não desconfortável
2,45	Z	0,317	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,303	N.C.R*	Não desconfortável
2,50	Z	0,288	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,283	N.C.R*	Não desconfortável
2,55	Z	0,236	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,240	Não desconfortável	Não desconfortável
2,60	Z	0,185	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,195	Não desconfortável	Não desconfortável
2,65	Z	0,122	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,130	Não desconfortável	Não desconfortável
2,70	Z	0,094	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,094	Não desconfortável	Não desconfortável
2,75	Z	0,074	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,063	Não desconfortável	Não desconfortável
2,80	Z	0,084	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,074	Não desconfortável	Não desconfortável

N.C.R* => Nível de conforto reduzido

Tabela 7.59 – Verificação das acelerações de pico para o MC3

Frequência	Eixo	a _{pico} (m/s ²)	CEB 209 (1991)	Bachmann et al (1995)
2,10	Z	0,246	Claramente perceptível	Aceitável
2,15	Z	0,399	Claramente perceptível	Aceitável
2,20	Z	0,307	Claramente perceptível	Aceitável
2,25	Z	0,336	Claramente perceptível	Aceitável
2,30	Z	0,385	Claramente perceptível	Aceitável
2,35	Z	0,439	Claramente perceptível	Aceitável
2,40	Z	0,558	Desconfortável	Aceitável
2,45	Z	0,678	Desconfortável	Aceitável
2,50	Z	0,760	Desconfortável	Aceitável
2,55	Z	0,784	Desconfortável	Aceitável
2,60	Z	0,423	Claramente perceptível	Aceitável
2,65	Z	0,336	Claramente perceptível	Aceitável
2,70	Z	0,257	Claramente perceptível	Aceitável
2,75	Z	0,193	Claramente perceptível	Aceitável
2,80	Z	0,244	Claramente perceptível	Aceitável

Tabela 7.60 – Verificação das acelerações em VDV para o MC3

Frequência	Eixo	a (m/s ^{1,75})	Ellis e Littler (2004)	Setareh (2012)
2,10	Z	0,113	Aceitável	Aceitável
2,15	Z	0,126	Aceitável	Aceitável
2,20	Z	0,146	Aceitável	Aceitável
2,25	Z	0,166	Aceitável	Aceitável
2,30	Z	0,200	Aceitável	Aceitável
2,35	Z	0,251	Aceitável	Aceitável
2,40	Z	0,330	Aceitável	Aceitável
2,45	Z	0,385	Aceitável	Aceitável
2,50	Z	0,346	Aceitável	Aceitável
2,55	Z	0,455	Aceitável	Aceitável
2,60	Z	0,241	Aceitável	Aceitável
2,65	Z	0,168	Aceitável	Aceitável
2,70	Z	0,127	Aceitável	Aceitável
2,75	Z	0,089	Aceitável	Aceitável
2,80	Z	0,097	Aceitável	Aceitável

B.P.C.A*=> Baixa probabilidade de um comentário adverso

Tabela 7.61 – Verificação das acelerações em *RMS* para o MC3

Proposta	Eixo	a (m/s ²)	ISO 2631 (1985)	ISO 2631 (1997)
2,10	Z	0,061	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,052	Não desconfortável	Não desconfortável
2,15	Z	0,069	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,060	Não desconfortável	Não desconfortável
2,20	Z	0,081	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,071	Não desconfortável	Não desconfortável
2,25	Z	0,095	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,085	Não desconfortável	Não desconfortável
2,30	Z	0,117	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,104	Não desconfortável	Não desconfortável
2,35	Z	0,147	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,133	Não desconfortável	Não desconfortável
2,40	Z	0,193	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,178	Não desconfortável	Não desconfortável
2,45	Z	0,223	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,210	Não desconfortável	Não desconfortável
2,50	Z	0,202	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,197	Não desconfortável	Não desconfortável
2,55	Z	0,267	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,278	N.C.R*	Não desconfortável
2,60	Z	0,140	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,155	Não desconfortável	Não desconfortável
2,65	Z	0,094	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,109	Não desconfortável	Não desconfortável
2,70	Z	0,071	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,084	Não desconfortável	Não desconfortável
2,75	Z	0,048	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,054	Não desconfortável	Não desconfortável
2,80	Z	0,049	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,049	Não desconfortável	Não desconfortável

N.C.R* => Nível de conforto reduzido

Tabela 7.62 – Verificação das acelerações de pico para o MC4

Frequência	Eixo	a _{pico} (m/s ²)	CEB 209 (1991)	Bachmann et al (1995)
2,10	Z	0,266	Claramente perceptível	Aceitável
2,15	Z	0,446	Claramente perceptível	Aceitável
2,20	Z	0,334	Claramente perceptível	Aceitável
2,25	Z	0,370	Claramente perceptível	Aceitável
2,30	Z	0,430	Claramente perceptível	Aceitável
2,35	Z	0,492	Claramente perceptível	Aceitável
2,40	Z	0,604	Desconfortável	Aceitável
2,45	Z	0,737	Desconfortável	Aceitável
2,50	Z	0,649	Desconfortável	Aceitável
2,55	Z	0,870	Desconfortável	Aceitável
2,60	Z	0,461	Claramente perceptível	Aceitável
2,65	Z	0,347	Claramente perceptível	Aceitável
2,70	Z	0,285	Claramente perceptível	Aceitável
2,75	Z	0,218	Claramente perceptível	Aceitável
2,80	Z	0,295	Claramente perceptível	Aceitável

Tabela 7.63 – Verificação das acelerações em VDV para o MC4

Frequência	Eixo	a (m/s ^{1,75})	Ellis e Littler (2004)	Setareh (2012)
2,10	Z	0,123	Aceitável	Aceitável
2,15	Z	0,140	Aceitável	Aceitável
2,20	Z	0,159	Aceitável	Aceitável
2,25	Z	0,184	Aceitável	Aceitável
2,30	Z	0,222	Aceitável	Aceitável
2,35	Z	0,275	Aceitável	Aceitável
2,40	Z	0,354	Aceitável	Aceitável
2,45	Z	0,417	Aceitável	Aceitável
2,50	Z	0,401	Aceitável	Aceitável
2,55	Z	0,473	Aceitável	Aceitável
2,60	Z	0,261	Aceitável	Aceitável
2,65	Z	0,175	Aceitável	Aceitável
2,70	Z	0,132	Aceitável	Aceitável
2,75	Z	0,095	Aceitável	Aceitável
2,80	Z	0,111	Aceitável	Aceitável

B.P.C.A*=> Baixa probabilidade de um comentário adverso

Tabela 7.64 – Verificação das acelerações em *RMS* para o MC4

Proposta	Eixo	a (m/s ²)	ISO 2631 (1985)	ISO 2631 (1997)
2,10	Z	0,068	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,064	Não desconfortável	Não desconfortável
2,15	Z	0,078	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,075	Não desconfortável	Não desconfortável
2,20	Z	0,090	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,091	Não desconfortável	Não desconfortável
2,25	Z	0,106	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,108	Não desconfortável	Não desconfortável
2,30	Z	0,129	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,132	Não desconfortável	Não desconfortável
2,35	Z	0,161	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,163	Não desconfortável	Não desconfortável
2,40	Z	0,207	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,206	Não desconfortável	Não desconfortável
2,45	Z	0,242	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,240	Não desconfortável	Não desconfortável
2,50	Z	0,236	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,238	Não desconfortável	Não desconfortável
2,55	Z	0,269	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,279	N.C.R*	Não desconfortável
2,60	Z	0,152	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,165	Não desconfortável	Não desconfortável
2,65	Z	0,098	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,110	Não desconfortável	Não desconfortável
2,70	Z	0,073	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,081	Não desconfortável	Não desconfortável
2,75	Z	0,051	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,053	Não desconfortável	Não desconfortável
2,80	Z	0,056	Não desconfortável	Não desconfortável
	X	0,058	Não desconfortável	Não desconfortável

N.C.R* => Nível de conforto reduzido

Das tabelas 7.55; 7.58; 7.61 e 7.64 pode ser inferido que o ponto crítico da estrutura não apresentou falhas para nenhum caso de carregamento quando observadas as acelerações em *RMS* conforme sugerem as normas ISO 2631 (1985 e 1997), sejam nos sentidos radial ou vertical.

Com relação às acelerações verticais em VDV, percebe-se que o ponto crítico não apresenta preocupação quando observados os limites propostos por Ellis e Littler (2004), porém, apresenta valores ligeiramente acima dos limites colocados por Setareh (2012), para os casos de carregamento MC1 e MC2, na frequência de carga igual a 2,40Hz.

Para as acelerações verticais de pico não se observam valores acima de $1,00\text{m/s}^2$, de modo que se encontram dentro dos limites aceitáveis por Bachmann et al (1995). Já com relação ao CEB 209 (1991), as acelerações de pico encontradas para alguns casos de carregamento só são aceitáveis com a consideração da variação de duas vezes do limite de $0,55\text{m/s}^2$ aceito pelo boletim.

A partir das análises realizadas pode ser verificada a existência de uma grande diferença entre os critérios de aceitação de acelerações em *RMS*, VDV e de Pico. Para todos os casos analisados, em nenhuma situação ou ponto a estrutura apresenta problemas quando verificadas pelos critérios de aceleração em *RMS*, enquanto que para aqueles que adotam as acelerações em VDV e de Pico a arquibancada apresenta pontos com valores acima dos recomendados. Isso mostra um pouco da subjetividade existente e o quanto ainda é necessária a discussão sobre o assunto de forma que seja encontrada a proposta mais adequada na análise do conforto humano no que tange às vibrações.

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões alcançadas neste trabalho, além de algumas sugestões para trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

8.1. CONCLUSÕES

8.1.1. Análise modal

Através da análise modal, pode-se verificar que todos os 20 primeiros modos de vibração da estrutura possuem frequência natural inferior ao valor mínimo recomendado pela NBR 6118 (2014), que é de 9,60Hz. Isso não necessariamente significa um problema, tendo em vista que mesmo com os baixos valores de frequências naturais, a arquibancada não apresenta grandes níveis de vibração. Para o atendimento da norma seria necessário aumentar a frequência fundamental da estrutura, seja pela redução da massa em movimentação e/ou pelo aumento da rigidez dos elementos estruturais, situação que poderia ser bastante onerosa em função da quantidade e tipo de material necessário para a execução da obra, além das perdas relacionadas à questão estética. Isso mostra que o critério previsto pela referida norma não apresenta a situação ideal de projeto, de forma que se sugere a inserção de critérios de análise dinâmica em sua próxima revisão, em consonância com as recomendações previstas em outros normativos internacionais.

Com relação à contribuição dos modos para as vibrações do sistema, pode ser observado que grande parte das acelerações decorre da excitação do quinto, sexto e sétimo modos e não dos primeiros, como se imagina a princípio. Isso provém principalmente das componentes de deslocamento que cada modo apresenta, ou seja, da interação da ação dinâmica com os modos de vibração. O primeiro, e o quarto modos apresentam flexão tangencial, situação que confere deslocamentos nesta direção, ao passo que o segundo apresenta flexão no sentido radial, e, portanto deslocamentos no eixo “X”. Já o terceiro modo apresenta torção no plano “XY”, e, assim sendo, deslocamentos em ambos os eixos. Desta forma, os quatro primeiros modos apresentam deslocamentos nos sentidos ortogonais aos do carregamento aplicado, não interagindo muito com as cargas dinâmicas, que são aplicadas na direção vertical. Já o quinto, sexto e sétimo modos apresentam flexão da arquibancada, situação que confere ao sistema componente de deslocamento no sentido vertical, e, portanto, com maior possibilidade de excitação com os saltos do público, ou seja, maior interação dinâmica.

Análise dinâmica considerando diferentes cenários de carregamentos

- **Carregamento no sentido tangencial**

A inserção de um carregamento no sentido tangencial em conjunto com o existente no sentido vertical, conforme apresentado no modelo de cálculo MC6, mostra um ponto interessante a ser observado. Apesar de os valores de aceleração tangencial não superarem os limites sugeridos pela ISO 2631 (1985 e 1997), a inclusão de uma parcela de apenas 1% da carga vertical atuando em conjunto no sentido tangencial apresenta um aumento de acelerações tangenciais em *RMS* na faixa de 8% a 12% para os pontos analisados. Isso mostra a importância de se fazer esse tipo de consideração na verificação de conforto das arquibancadas, face à possibilidade de serem excitados modos de vibração que possuam componentes de deslocamentos no sentido tangencial, seja pela flexão da estrutura no eixo “Y”, ou ainda pela torção no plano “XY”. Apesar de menos trivial, a possibilidade da arquibancada receber carregamentos que contenha componente em dois eixos não é tão remota. Um exemplo comum são as coreografias das torcidas organizadas, onde o público salta não só na vertical, mas também no sentido horizontal, em movimentos de vai e vem.

- **Frequência de carregamento**

Outro ponto importante observado no trabalho é a importância da variação da frequência de carregamento na análise de conforto. Na realização dos estudos pode ser notado que alterações nos ciclos de carga acarretam em grandes mudanças nas vibrações da estrutura. Além disso, não existe um valor único que maximize os efeitos da vibração em todos os pontos e sentidos na arquibancada. Neste trabalho, por exemplo, os piores índices de aceleração no sentido radial e vertical ocorrem para o segundo ponto de análise com cargas cíclicas à frequência de 2,55Hz. Nesta situação, as maiores colaborações para as vibrações da arquibancada decorrem do quinto, sexto e sétimo modos, que possuem componentes de deslocamentos horizontais e verticais devido à flexão da arquibancada e frequências naturais iguais a $f_5 = 4,95\text{Hz}$, $f_6 = 5,07\text{Hz}$ e $f_7 = 5,12\text{Hz}$, próximas ao segundo harmônico do carregamento. Já para a direção tangencial, a pior situação ocorre para o terceiro ponto de análise quando aplicado o carregamento com frequência de 2,75Hz. Esta frequência de carga excita principalmente o quarto modo de vibração, que apresenta componente de deslocamento na direção “Y” e frequência natural $f_4 = 2,78\text{Hz}$.

- **Acomodação do público nas arquibancadas**

Pode ser verificado no trabalho apresentado que as variações quanto à acomodação das pessoas podem representar alterações consideráveis nas vibrações das arquibancadas. Apesar de menos frequentes, situações onde existam áreas sem público podem ocorrer, seja em função de separação de torcidas, pela necessidade de alguma manutenção, pelo fechamento de parte da arquibancada em função da quantidade de pessoas em um espetáculo ou ainda por algum interesse da administração do estádio.

Conforme apresentado no capítulo 7, os piores índices de conforto em termos de aceleração de pico no sentido vertical ocorrem para as arquibancadas totalmente tomadas (MC5), porém, quando observadas as acelerações em VDV no sentido vertical e em *RMS* no sentido vertical e radial, a situação onde apenas os vãos laterais foram carregados (MC2) apresenta os piores índices de vibração.

Quando verificadas as acelerações no sentido tangencial, as piores situações de carregamento ocorrem para os modelos onde os carregamentos são aplicados de forma excêntrica, ou seja, o MC1 e o MC3, com 25% e 50% da ocupação feita, respectivamente. A explicação pode ser entendida da seguinte forma: a excentricidade do carregamento acarreta em deslocamentos tangenciais e, conseqüentemente, as acelerações nesse sentido tendem a aumentar, uma vez que os modos de vibração que possuem componentes de deslocamento no eixo “Y” ficam passíveis de excitação. No caso analisado, por exemplo, as maiores acelerações tangenciais ocorreram para o MC3 com frequência de carga igual a 2,75Hz, valor muito próximo da ressonância com o quarto modo de vibração, modo este que apresenta flexão no sentido tangencial. De fato, o espectro de acelerações tangenciais mostra que este é o modo que mais contribui para as acelerações em “Y”.

- **Conforto humano sem a consideração dos dispositivos de atenuação**

De forma geral, a estrutura analisada neste trabalho não oferece grandes preocupações em relação ao conforto humano, sendo que apenas parte do primeiro e quarto vãos (simetria) da arquibancada superior apresentam níveis superiores aos recomendados pela literatura para os modelos de carregamento considerados. De certa forma já se esperava que o Estádio Nacional de Brasília não apresentasse tantos problemas relacionados ao conforto humano, uma vez que já foi construído conforme as novas tendências de projeto. Sua

estrutura não possui grandes balanços e a cobertura das arquibancadas trabalha de forma independente do restante da arquibancada, não sendo passível de movimentação devido aos pulos dos torcedores. Esta situação é bastante diferente da existente em estádios mais antigos construídos no Brasil e que apresentaram maiores níveis de vibração, como o Maracanã e o Mineirão, por exemplo.

No entanto, é interessante que todo o público tenha boas condições de conforto. Nesse sentido, pequenas alterações na estrutura podem ser suficientes para que se consiga reduzir as acelerações a níveis aceitáveis, como, por exemplo, com a instalação de amortecedores com massas próximas a uma tonelada, conforme aqui mostrado.

- **Utilização de AMS e AMSM no controle de vibrações**

De modo geral, os estudos de atenuação das vibrações com AMS e AMSM se mostraram interessantes e eficazes para a estrutura analisada, tendo em vista a redução das vibrações ocorridas, a possibilidade de instalação levando em conta os esforços solicitantes (verificação apresentada em anexo) e o custo reduzido de instalação e operação em relação a outros dispositivos de controle de vibração.

Conforme já comentado, os estudos são realizados no ponto crítico da arquibancada, sendo este o único onde se observa acelerações acima dos níveis sugeridos pela literatura e normas estudadas. A escolha pelo modelo de carga decorre de o MC5 ter apresentado a maior aceleração de pico para o ponto analisado, além da maior possibilidade de ocorrência, uma vez que considera as arquibancadas totalmente tomadas. As frequências de sintonização provêm do espectro de acelerações, que mostra que os modos que mais contribuem para a aceleração vertical no referido ponto são o quinto, sexto e sétimo, cujas frequências naturais iguais a $f_4 = 4,95\text{Hz}$, $f_5 = 5,07\text{Hz}$ e $f_6 = 5,12\text{Hz}$, além da sintonização com o segundo harmônico do carregamento, que é igual a $2,55\text{Hz}$.

A sintonização dos amortecedores considerando a quinta frequência natural da estrutura praticamente não trouxe benefícios. O quinto modo apresenta deslocamentos verticais máximos próximos aos cantos superiores da arquibancada, sendo este o melhor local para a instalação dos AMS quando se consideram as contribuições deste modo de vibração. Já o sexto e sétimo modos, que são os que mais contribuem para as acelerações no ponto estudado, possuem deslocamentos verticais máximos próximos ao meio do primeiro e

quarto vãos da arquibancada e se encontram longe do ponto de instalação dos amortecedores adotado nessa proposta, fato que explica a baixa eficiência encontrada.

Já quando sintonizados próximos ao segundo harmônico do carregamento, à sexta e à sétima frequência natural, os amortecedores apresentam bom desempenho e conseguem reduzir as acelerações em VDV a valores aceitáveis, conforme Ellis e Littler (2004) e Setareh (2012), bem como as acelerações de pico quando observadas as recomendações de Bachmann *et al* (1995). Já para o CEB 209 (1991) os limites só são aceitos se for considerada a variação de duas vezes do limite indicado, aceita pelo boletim.

Para os estudos de atenuação com os AMS utilizando massa em torno de quatro toneladas ($\mu = 0,001$), os melhores resultados em termos de aceleração de pico e em *RMS* (aceleração vertical) são obtidos para a sintonização próxima à sétima frequência natural. Quanto às acelerações em VDV e em *RMS* (aceleração radial), a melhor solução ocorre para a sintonização próxima ao segundo harmônico da carga.

Em relação aos estudos feitos para sintonização dos amortecedores com massa próxima a duas toneladas ($\mu = 0,0005$), o melhor resultado em termos de acelerações de pico é obtido para quatro AMSM sintonizados próximos à sexta frequência natural, enquanto que para as acelerações em VDV e *RMS* (radial e vertical), a proposta que utiliza de dois AMS sintonizados aproximadamente iguais à sexta frequência natural é a que apresenta maiores reduções de vibração.

Para os estudos da redução de vibração feita com amortecedores cujas massas se aproximam de uma tonelada ($\mu = 0,00025$) a maior redução de aceleração de pico é alcançada na utilização de quatro AMSM sintonizados próximos à sexta frequência natural, enquanto que para as acelerações em VDV e *RMS* (radial e vertical) a sintonização de dois AMS próximos à sexta frequência foi a proposta que apresentou a maior eficiência.

No geral, a sintonização de amortecedores considerando a sexta frequência natural foi a que apresentou a melhor solução, no entanto, não foi uma regra. Além disso, pode ser observado que os modelos de AMS apresentam melhores resultados quando se observa as acelerações em *RMS* (radial e vertical) e VDV, ao passo que as maiores reduções de pico vertical ocorrem para a utilização de AMSM.

Assim, é importante ainda observar dois pontos. O primeiro deles é que não existe uma solução única que minimize as acelerações em todos os eixos. Uma determinada configuração de AMS ou AMSM pode apresentar a melhor proposta para a redução de acelerações em uma determinada direção, mas, pode não ser a melhor opção se for considerado o sentido ortogonal. Isso pode ser explicado pelas colaborações de cada modo em relação a cada sentido de vibração, assim: supondo dois modos que tenham componentes verticais e radiais de deslocamento no ponto analisado, se o amortecedor é sintonizado próximo ao modo que possui maior componente de deslocamento vertical, é esperado que as acelerações em “Z” tenham maior redução, ao passo que quando os amortecedores são sintonizados próximos ao modo que possui componente vertical menos pronunciada, mas a radial seja preponderante, a redução da vibração na direção vertical deve ser inferior, porém, as acelerações no eixo “X” devem sofrer maior redução. O segundo é que não existe uma proporção igual entre as reduções de acelerações de pico, *RMS* ou VDV, ou seja, uma determinada configuração pode apresentar maior diminuição de aceleração de pico enquanto outra pode ser melhor para atenuar as acelerações em *RMS*. Essa situação é mostrada claramente na segunda proposta de atenuação das vibrações estudada, conforme mostra a figura 7.67. Como pode ser visto, o início da curva de acelerações apresenta valores superiores à existente na estrutura sem o controle inserido para os cinco primeiros ciclos de carga, passando por valores parecidos para o sexto e sétimo ciclos e então, valores bastante reduzidos a partir do oitavo ciclo de carregamento. Com isso, as acelerações de pico sofrem pouca redução em relação à estrutura não controlada, porém, o mesmo não acontece para as demais acelerações.

8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.2.1. Atualização do modelo estrutural

- **Atualização dos dados físicos e geométricos**

Atualizar o modelo geométrico do estádio a partir da realização de uma minuciosa vistoria *in loco*, comparando se as seções transversais dos elementos estruturais foram construídas conforme consta no projeto. Verificar o tratamento dado às juntas de dilatação e como foi feita a ligação das bancadas pré-moldadas com as vigas jacaré, bem como a condição de continuidade dos elementos pré-moldados. Observar ainda se existem falhas de concretagem e fissuração dos elementos estruturais. Realizar ensaios no

concreto, com o intuito de verificar a sua resistência e o módulo de elasticidade, de modo que se possa fazer a atualização do modelo em relação aos parâmetros físicos. Observar ainda a influência da massa adicional existente, como cadeiras, corrimãos e revestimentos que porventura existam na estrutura. Realizar então uma extensa campanha de testes experimentais e verificar se o modelo está bem calibrado.

- **Realizar estudo levando em conta a interação solo-estrutura**

Verificar a influência da inserção dos elementos de fundação e da interação solo-estrutura na análise modal da arquibancada.

8.2.2. Verificações dos carregamentos e demais parâmetros

- **Verificar o comportamento do público e utilizar modelos biodinâmicos de carga**

Verificar o comportamento das torcidas e do público em shows que ocorrerem no estádio de maneira que se possam aplicar carregamentos mais próximos do que acontece na realidade. Dar atenção especial aos movimentos laterais do público, face à possibilidade de vibração no sentido tangencial devido às baixas frequências naturais com deslocamentos neste sentido, conforme mostrado na análise modal. Aplicar o carregamento através de modelos biodinâmicos, levando em conta as contribuições de massa e amortecimento do corpo humano ao problema.

- **Variar os parâmetros dos dispositivos de atenuação**

Realizar um estudo com variação dos parâmetros dos AMS e AMSM e verificar se os métodos de Jangid e Den Hartog são os mais apropriados para modelar os amortecedores nesse tipo de estrutura.

- **Verificar a influência da defasagem de tempo na aplicação dos carregamentos**

Estudar a aplicação de carregamentos com defasagem de tempo entre diferentes vãos da arquibancada. Uma situação interessante seria a da aplicação das cargas levando em conta os deslocamentos verticais do sexto e sétimo modos de vibração, ou seja, o carregamento dos vãos laterais entraria quando estes vãos estivessem se deslocando para baixo, ao passo que o público dos dois vãos centrais estivesse no ar. No mesmo sentido, quando os vãos centrais apresentassem deslocamentos verticais negativos, o público desses vãos carregaria a estrutura, enquanto os torcedores dos demais vãos estariam no ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto* - Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. – *Vibrations in Structures Induced by Man and Machines* – Structural Engineering Documents - IABSE/AIPC/IVBH - Suíça, 1987.

BACHMANN, H.; PRETLOVE, A. J.; RAINER, J. H. – *Vibrations Problems in Structures: Practical Guidelines* – USA, Boston, 1995.

BAKRE, S. V., JANGID, R. S., *Optimum Parameters of Tuned Mass Damper for Damped Main System*. Structural Control and Health Monitoring, 14:448–470, 2006.

BARROS, T. P., *Análise Dinâmica em Passarela sujeita à Movimentação Humana*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2009.

BRIGHAM, E. O., *The Fast Fourier Transform and its Applications*, Prentice-Hall International Editions, USA, 1988.

BRITO, V. L., *Modelagem de Arquibancada Temporária Visando Investigação de Problemas de Vibração devido à Movimentação de Espectadores*. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, Brasil, 2011.

CAMPISTA, D. F., *Análise Dinâmica e Estudo de Conforto Humano das Arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CEB. *Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines*. Bulletin d'Information N° 209. Comité European du Béton, Suíça, 1991.

CLOUGH, R. W., PENZIEN, J. *Dynamic of Structures*. McGraw-Hill, Estados Unidos, 2003.

Computers and Structures, Inc., SAP2000 14.1, Structural Analysis Program, 2009.

DA SILVA, JOSÉ G.S.; DE ANDRADE, SEBASTIÃO A.L.; LOPES, ELVIS D.C. *Parametric modelling of the Dynamic Behavior of a Steel-Concrete Composite Floor*. Engineering Structures, v. 75, p. 327-339, 2014.

DALLARD, P., FITZPATRICK, A. I., FLINT, A., LE BOURVA, S., LOW, A., MITH, R. M. R., WILLEFORD, M. *The London Millennium Footbridge*. The Structural Engineer, Vol. 79/N°22. 20 November 2001.

D'AMBRA, R. B., ITURRIOZ, I., DOZ, G. *Estudio de las Características Dinámicas de Estadios de Fútbol*. In: XXVIII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 1997, São Carlos. Anais, 1997. v. 3. p. 915-924.

DE PAULA, F. A.; QUEIROZ, G. *Uso do MEF na Adaptação de uma Estrutura para Resistir a Solicitações Oriundas de Atividades Rítmicas*. Anais do II Simpósio de Mecânica Computacional, Ouro Preto, 1998.

DOS SANTOS, M. D. S. *Análise Numérica do Controle de Vibrações em Lajes de Edifícios Utilizando Amortecedores de Massa Sintonizados*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasil, 2009.

ELLIS, B. R.; LITTLER, J.D. *Response of Cantilever Grandstands to Crowd Loads, Part I: Serviceability Evaluation, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 157 SB4 p. 235-241, 2004.

FAÍSCA, R. G. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

GASPAR, C. M. R.; SILVA, J. G. S.; NEVES, L. F. C.. *Multimode Vibration Control of Building Steel-Concrete Composite Floors Submitted to Human Rhythmic Activities*. Computers & Structures, v. 165, p. 107-122, 2016.

GOMES, D. H. M. *Controle da Resposta Dinâmica de uma Passarela de Pedestres da Cidade de Brasília com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

INTERNATIONAL STANDARD FOR ORGANIZATION - *Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration - Part 1: General Requirements* – ISO 2631/1 - Suíça, 1985.

INTERNATIONAL STANDARD FOR ORGANIZATION –Mechanical Vibration and Shock – *Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration - Part 1: General Requirements* – ISO 2631/1 - Suíça, 1997.

JANGID, R. S., *Optimum Multiple Tuned Mass Dampers for Base-Excited Undamped System. Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 28:1041–1049, 1999.

JULIANI, M.A.C.; BECOCCI, L.; CAMILLO, A.; LOPES, C.P.; IGUTI, E.T.; TAKEUTI, A.R. *Avaliação Dinâmica das Arquibancadas do Estádio Olímpico João Havelange Utilizando Simulação Numérica e Monitoração*. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, 2005.

LARA, V. L. A., *Controle de Vibrações em Vigas Metálicas com Distintas Configurações de Apoio Utilizando Amortecedores de Massa Sintonizados*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

LIMA, D. V. F., *Controle de Vibrações Induzidas em uma Laje de uma Academia de Ginástica com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

LIMA, G. V. F., *Análise Dinâmica via Método dos Elementos Finitos do Estádio Nacional de Brasília*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MARTINS, C. A. P., ESTÊVÃO, M. C., *Caracterização Dinâmica das Bancadas Principais do Estádio Algarve*. 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Portugal, 2004.

MARTINS, C. M. A. *Vibrações Induzidas pelas Atividades Humanas em Ginásios e Salões de Dança*. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2011.

NOBREGA, P. G. B., *Análise Dinâmica de Estruturas de Concreto: Estudo Experimental e Numérico de Condições de Contorno de Estruturas Pré-Moldadas*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, 2004.

- REYNOLDS, P.; NOORMOHAMMADI, N. *Control of Human Induced Vibrations in Stadia Using a Hybrid Tuned Mass Damper*. University of Sheffield, Reino Unido, 2012.
- RODRIGUES, J. F. S. *Investigação dos Carregamentos de Estádios de Futebol*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Paulo, Brasil, 1998.
- RODRIGUES, J. F. S., *Ações Induzidas por Multidões em Estruturas de Arquibancadas*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo, Brasil, 2003.
- SACKS, M. P., BEHBOUDI, R., SWALLOW, J. C. *Tuned Mass Dampers For Soldier Field Stadium Grandstand Vibration*, Ontario – Canada, 2005.
- SEGUNDINHO, P. G. A., *Estudo das Vibrações Induzidas por Pedestres em Passarelas de Madeira*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, 2010.
- SENCECE, *Prefeitura do Rio Decide Interditar o Engenhão até 2015*. <<http://sengece.com.br/2013/06/20/prefeitura-do-rio-decide-interditar-engenhao-ate-2015/>> Sindicato dos Engenheiros do Estado do Ceará, Ceará, Brasil, 2013. Acesso em 11 de Abril de 2016.
- SETAREH, M. *Evaluation and Assessment of Vibrations Owing to Human Activity*. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, vol. 165(SB5). 2012. p. 219-31.
- SILVA, J.M.M.F., *Análise de Vibrações Sob Ação Humana na Ponte Pedonal Sobre a Linha Vermelha – Ilha do Fundão*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.
- SILVA, C.A.A.S., *Análise de Vibrações em Elementos Pré-Fabricados de Bancadas de Estádios* – Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2012.
- SOMMER, R. M. R., *Análise de Vibrações em Pisos Mistos Aço/Concreto*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2002.
- SOONG, T. T., DARGUSH, G. F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. Chichester. Jhon Wiley & Sons, 1997.

ANEXOS

A1 – DEMAIS MODOS DE VIBRAÇÃO DA ARQUIBANCADA

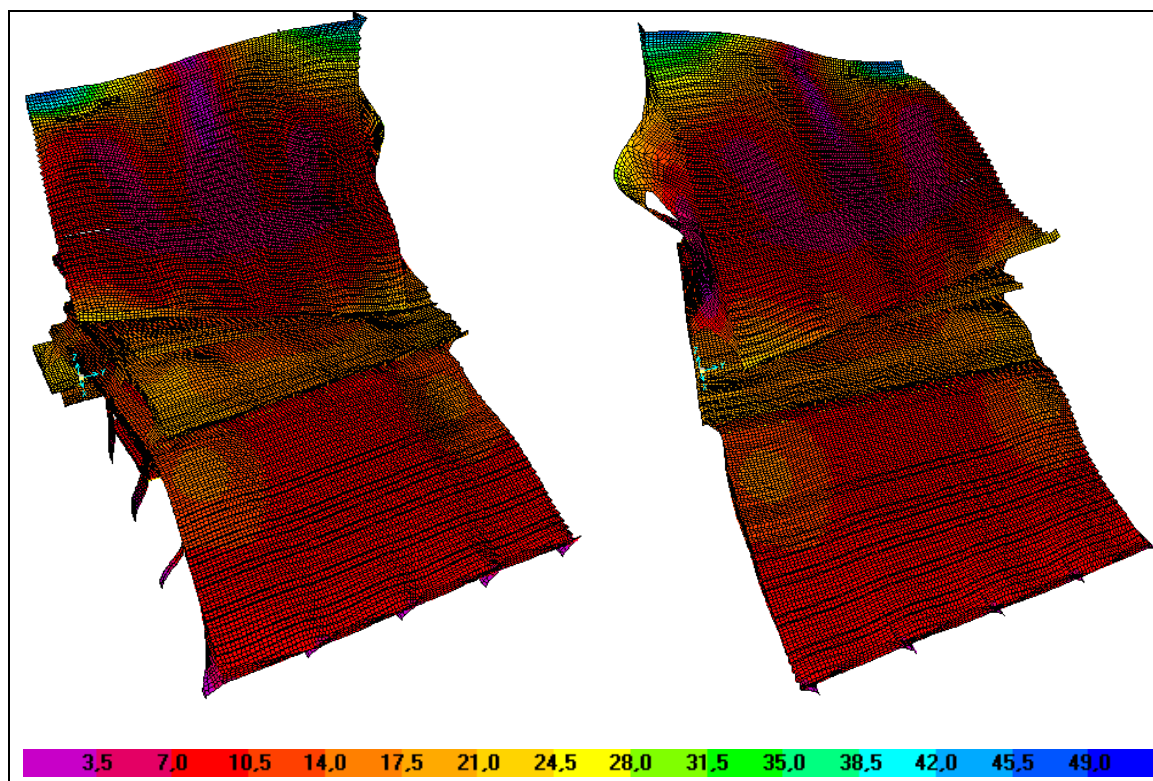


Figura A.1 – 9º modo de vibração – $f = 5,71\text{Hz}$ – Torção e flexão da arquivancada superior

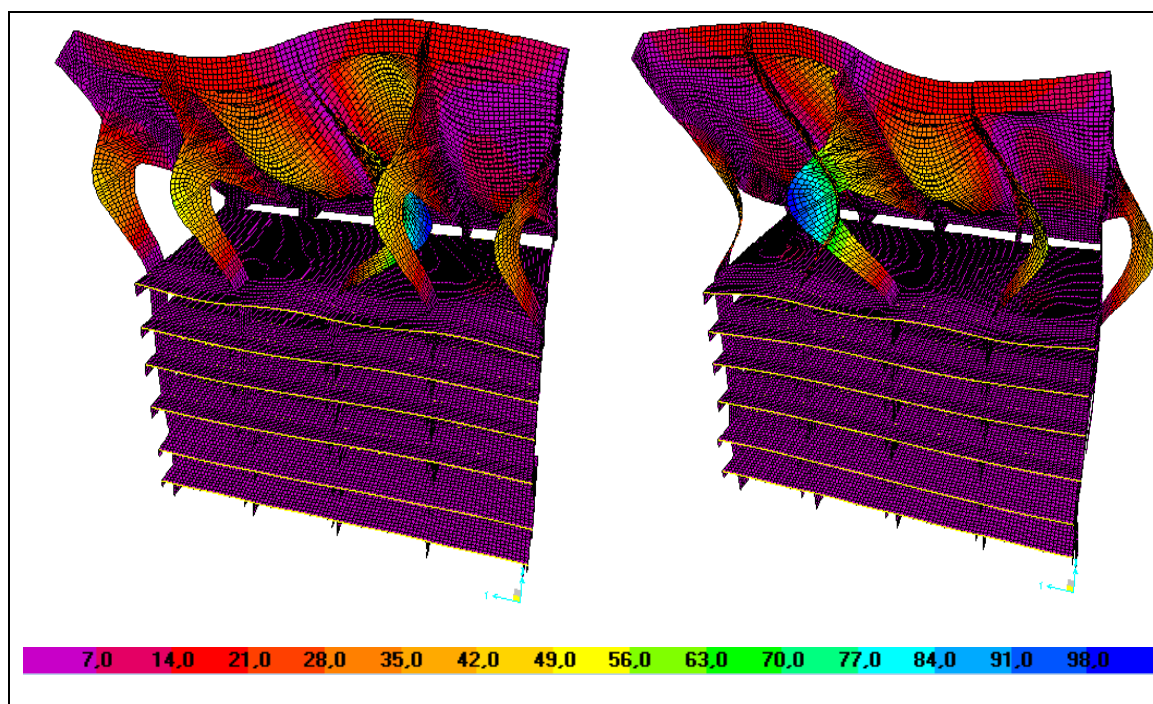


Figura A.2 – 10º modo de vibração – $f = 6,31\text{Hz}$ – Flexão da arquivancada superior e pilares

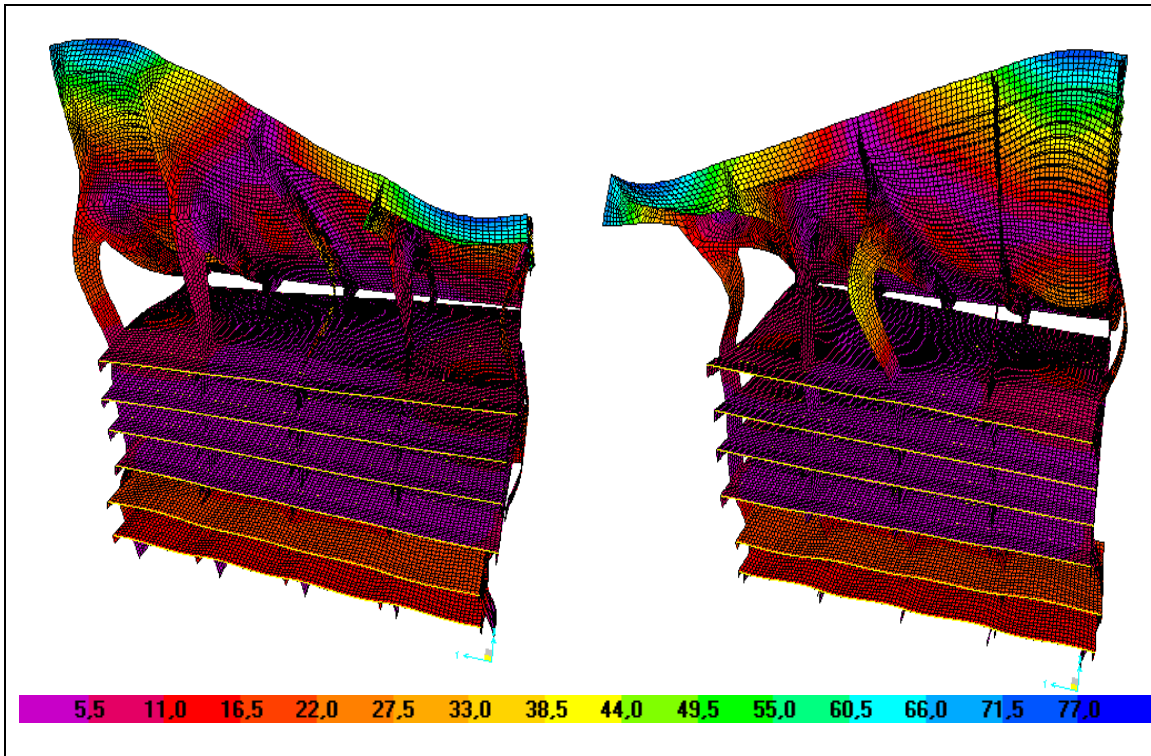


Figura A.3 – 11º modo de vibração – $f = 6,66\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada superior

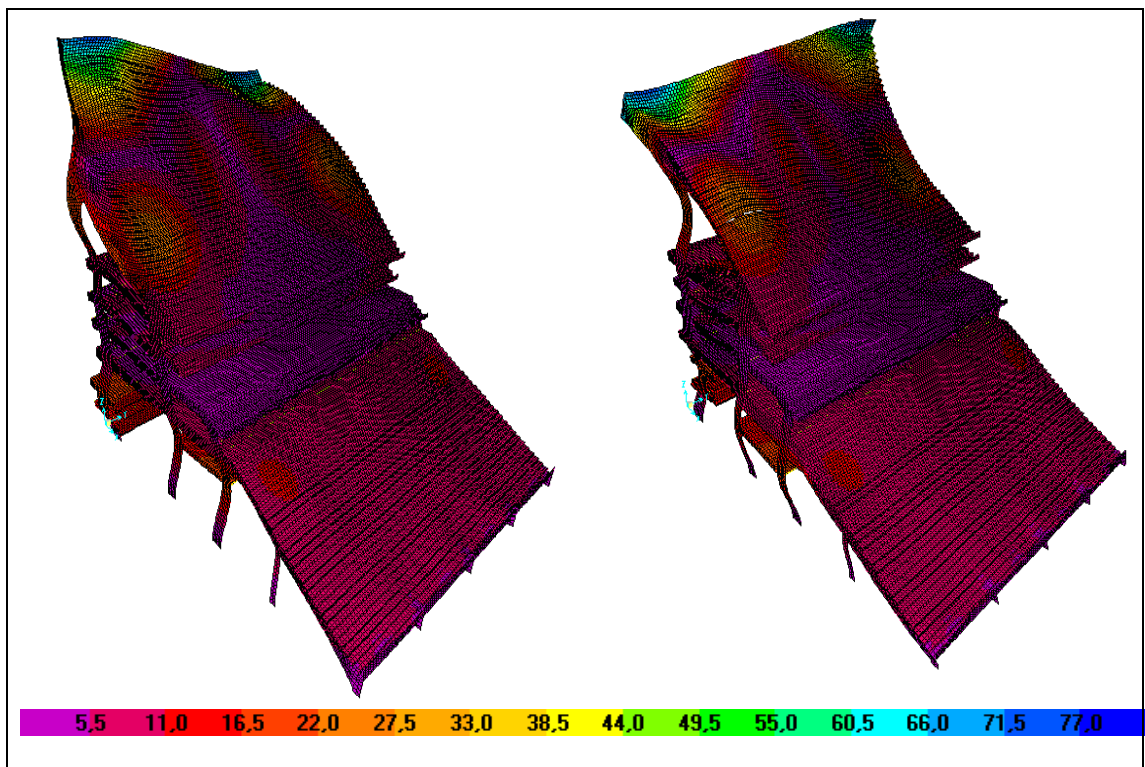


Figura A.4 – 12º modo de vibração – $f = 6,67\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada superior

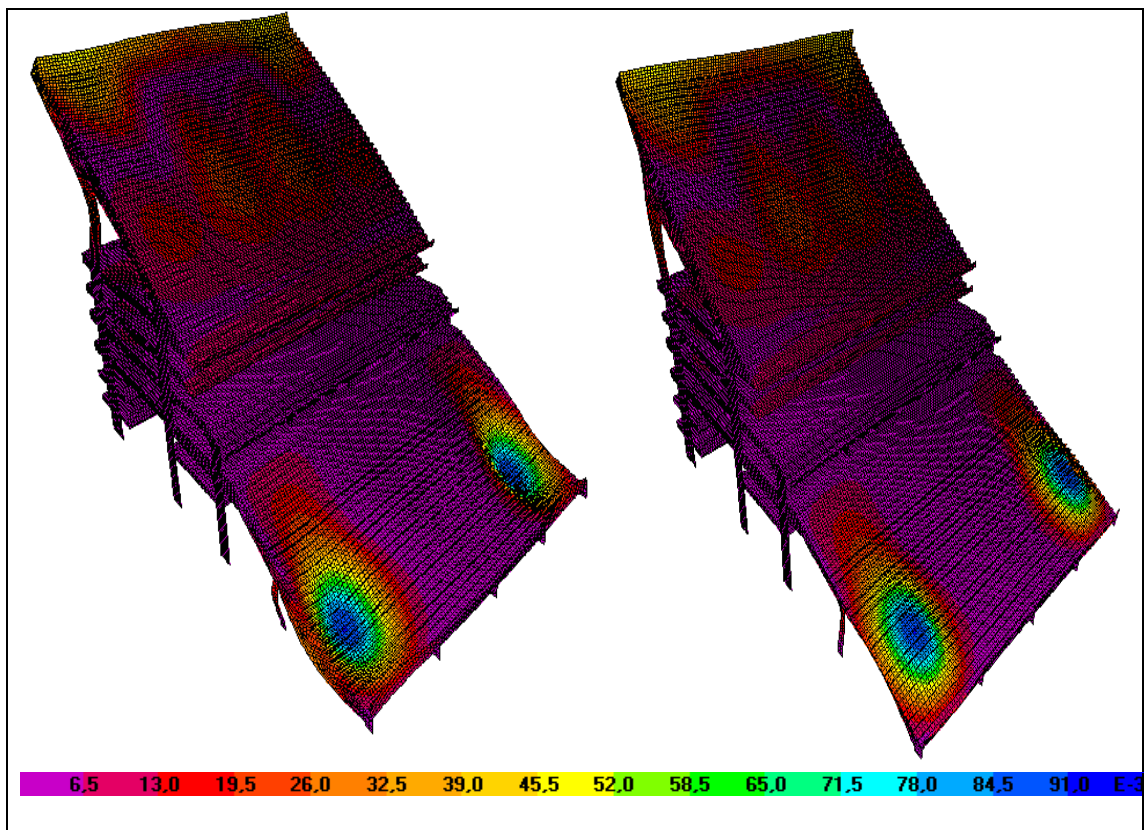


Figura A.5 – 13º modo de vibração – $f = 6,77\text{Hz}$ – Flexão das arquibancadas superior e inferior

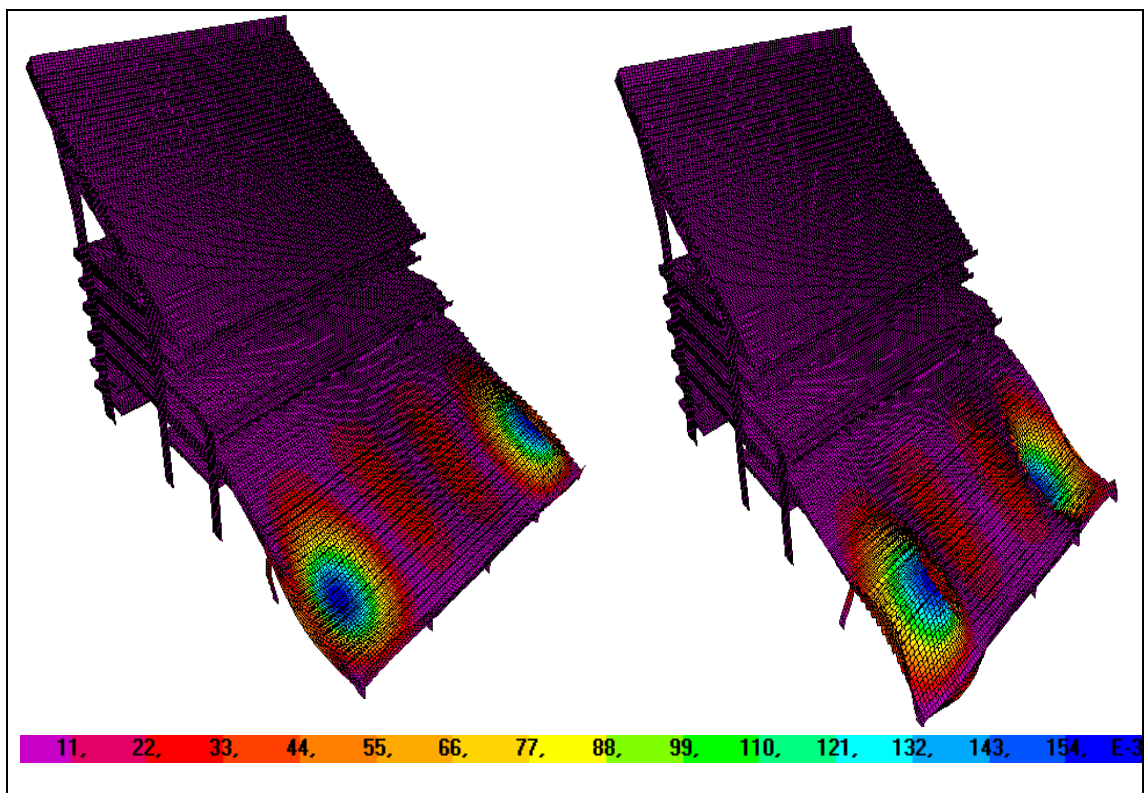


Figura A.6 – 14º modo de vibração – $f = 6,78\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada inferior

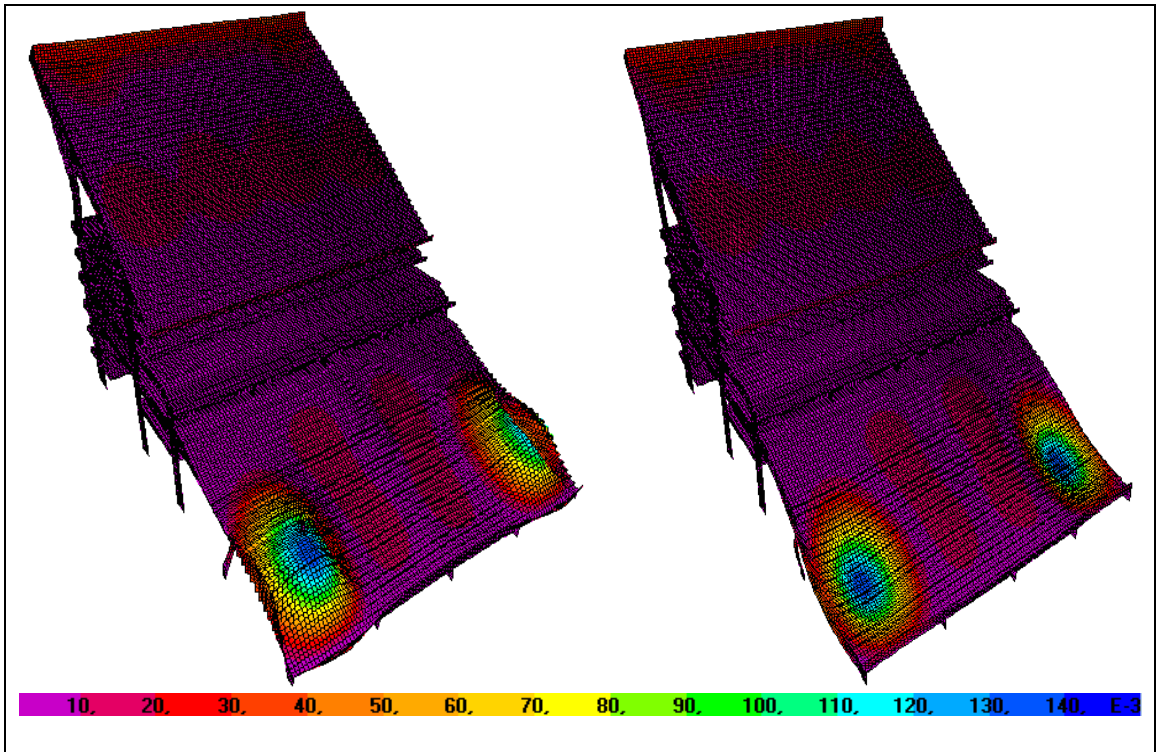


Figura A.7 – 15º modo de vibração – $f = 6,87\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada inferior e superior

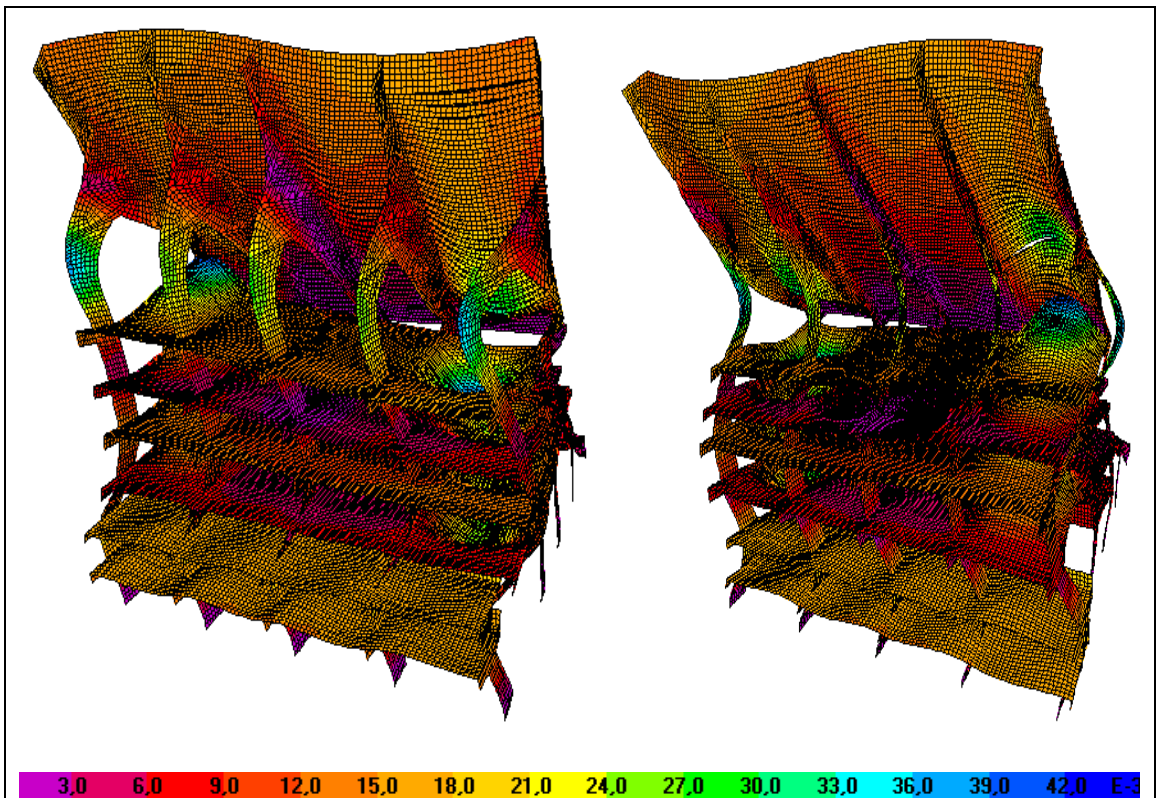


Figura A.8 – 16º modo de vibração – $f = 7,08\text{Hz}$ – Flexão das arquibancadas

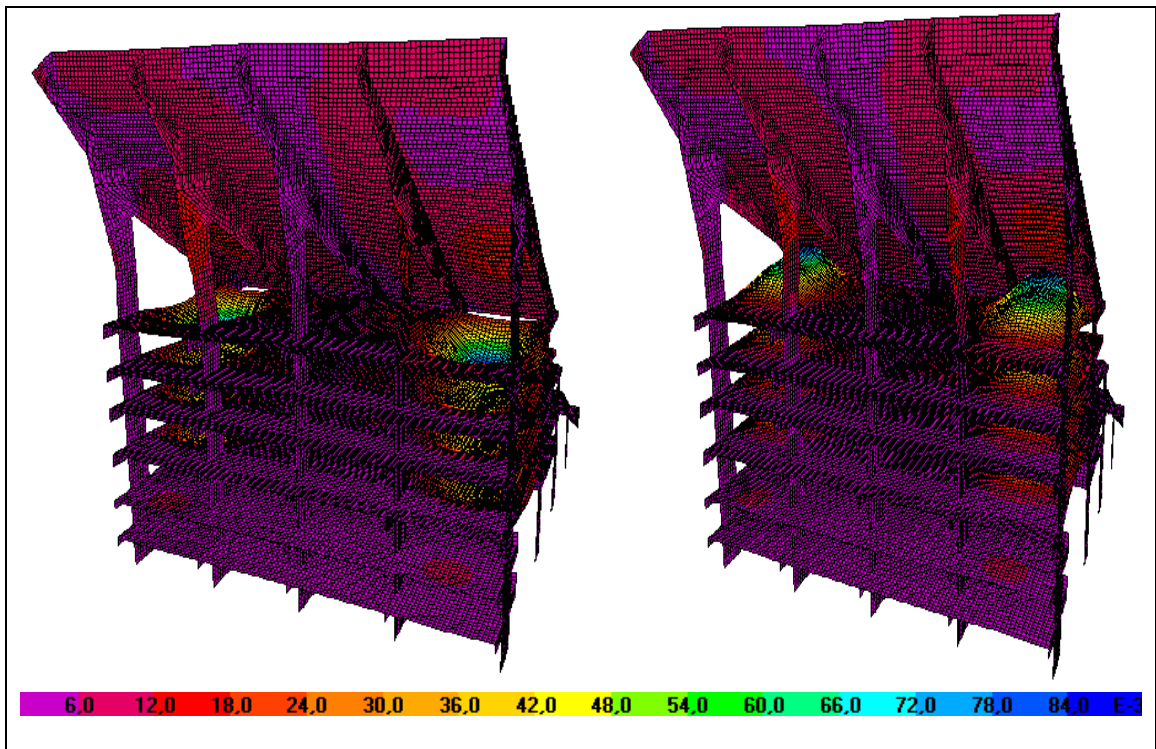


Figura A.9 – 17º modo de vibração – $f = 7,31\text{Hz}$ – Flexão dos pisos intermediários

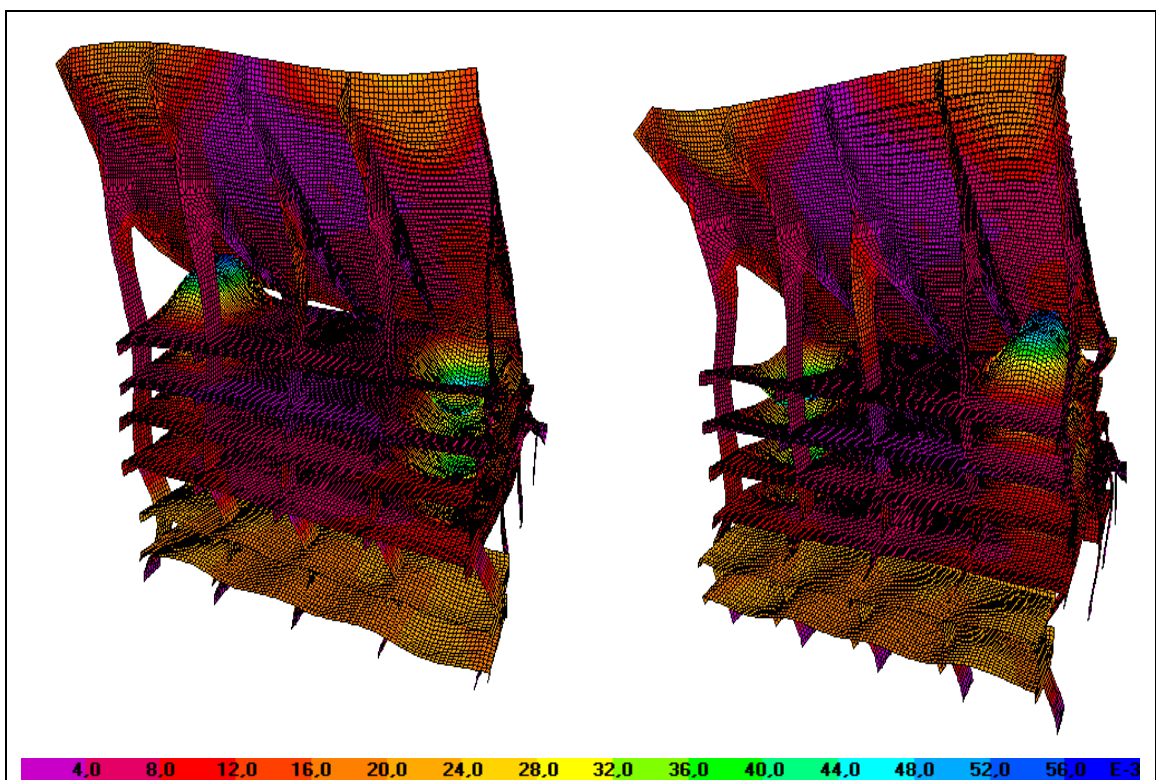


Figura A.10 – 18º modo de vibração – $f = 7,32\text{Hz}$ – Flexão do piso intermediário e arribancada superior

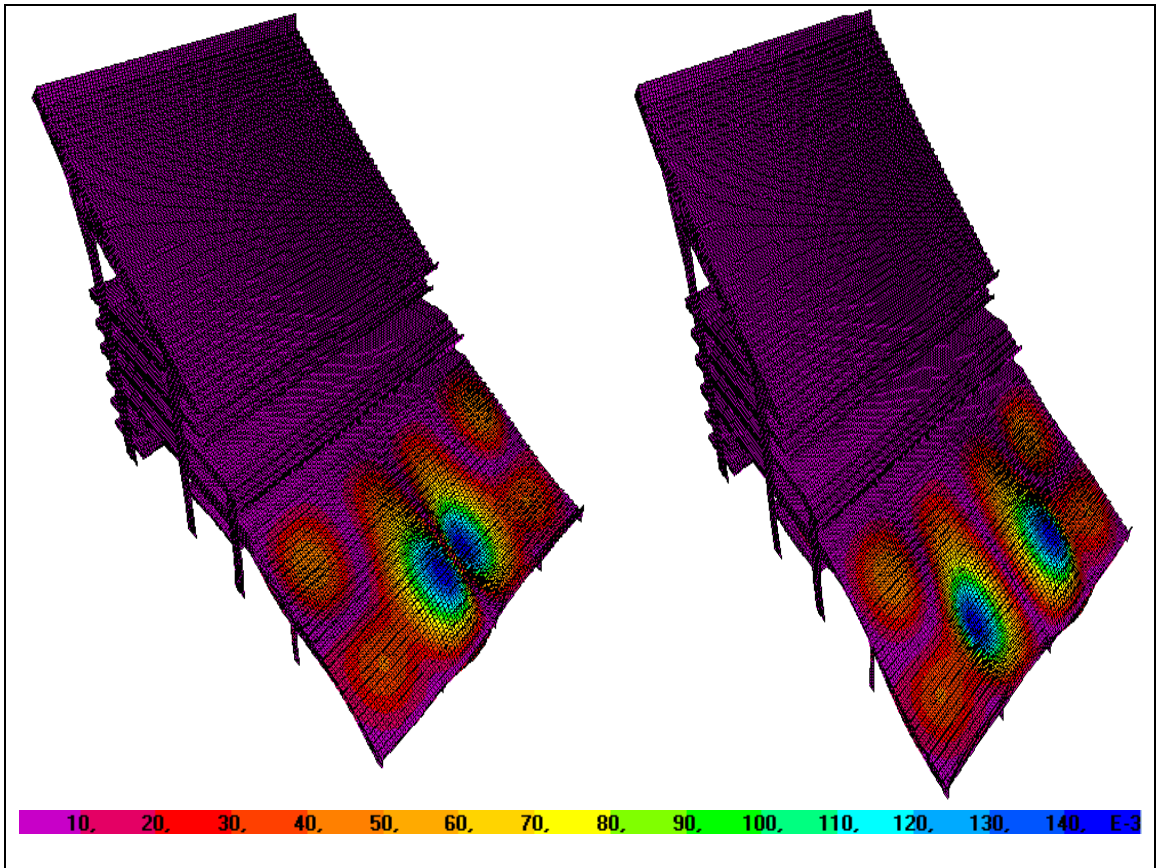


Figura A.11 – 19º modo de vibração – $f = 7,58\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada inferior

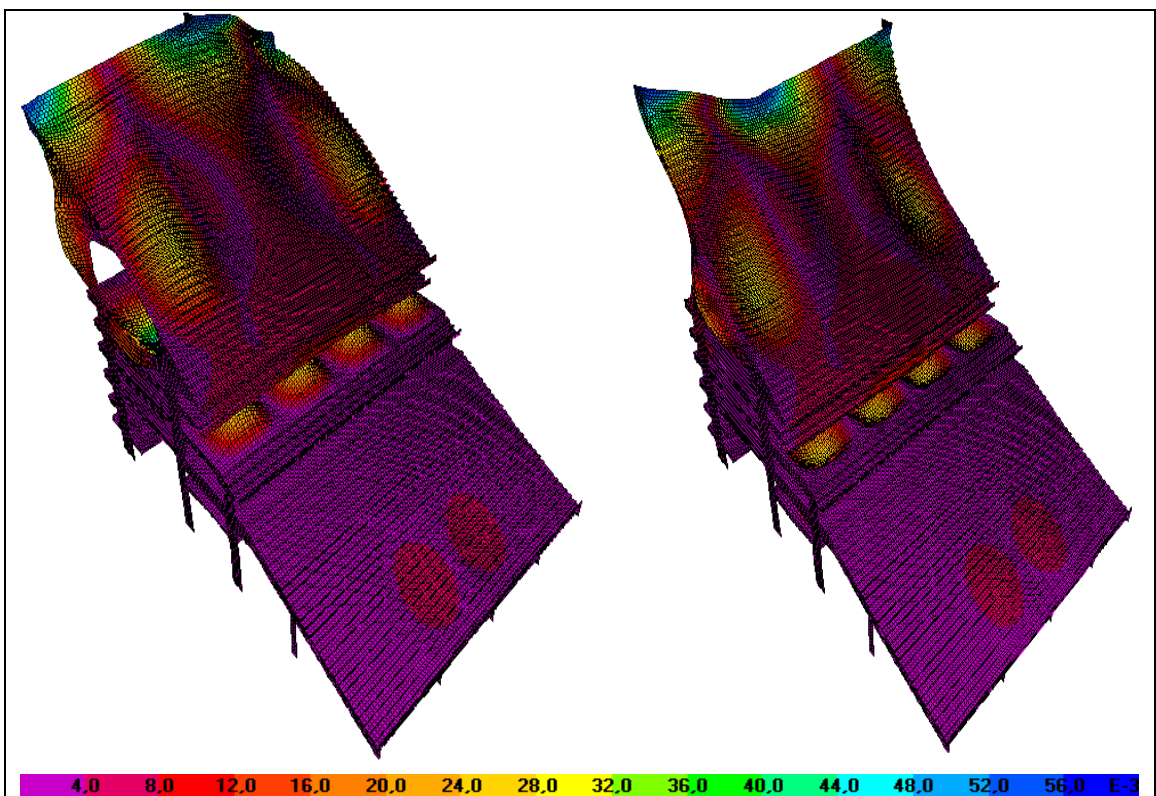


Figura A.12 – 20º modo de vibração – $f = 7,61\text{Hz}$ – Flexão da arquibancada superior

A2 – DESLOCAMENTOS E ACELERAÇÕES DOS QUATRO PONTOS ANALISADOS NOS MODELOS MC1 A MC6

Tabela A.1 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC1

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,132	0,354	0,163	0,817	0,270	1,205	0,112	0,190	0,232	0,155	0,293	0,090
2,15	0,196	0,602	0,302	1,553	0,463	2,304	0,207	0,351	0,416	0,261	0,504	0,173
2,2	0,190	0,396	0,218	0,883	0,309	1,287	0,131	0,190	0,234	0,160	0,336	0,100
2,25	0,246	0,387	0,263	0,929	0,309	1,324	0,131	0,195	0,242	0,173	0,326	0,110
2,3	0,176	0,425	0,232	1,006	0,337	1,410	0,119	0,213	0,254	0,240	0,365	0,119
2,35	0,138	0,469	0,220	1,054	0,377	1,477	0,126	0,229	0,237	0,247	0,400	0,142
2,4	0,142	0,501	0,214	1,098	0,411	1,570	0,130	0,249	0,246	0,232	0,427	0,138
2,45	0,155	0,522	0,257	1,186	0,438	1,679	0,136	0,292	0,255	0,215	0,446	0,136
2,5	0,243	0,529	0,316	1,294	0,457	1,772	0,157	0,332	0,280	0,220	0,456	0,140
2,55	0,333	0,504	0,342	1,475	0,445	1,959	0,193	0,349	0,320	0,291	0,422	0,173
2,6	0,245	0,602	0,206	0,951	0,537	1,246	0,202	0,403	0,388	0,234	0,573	0,133
2,65	0,207	0,744	0,179	0,715	0,675	1,024	0,215	0,524	0,385	0,243	0,708	0,141
2,7	0,193	0,765	0,189	0,628	0,731	0,950	0,259	0,640	0,377	0,224	0,728	0,146
2,75	0,159	0,856	0,183	0,597	0,849	0,911	0,305	0,793	0,340	0,175	0,827	0,116
2,8	0,166	0,817	0,312	1,102	0,807	1,683	0,310	0,754	0,278	0,184	0,794	0,101

Tabela A.2 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC2

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,174	0,036	0,204	0,828	0,005	1,202	0,071	0,009	0,153	0,298	0,008	0,159
2,15	0,227	0,063	0,355	1,583	0,008	2,311	0,096	0,017	0,269	0,484	0,015	0,289
2,2	0,289	0,039	0,273	0,879	0,007	1,286	0,118	0,010	0,160	0,307	0,009	0,169
2,25	0,418	0,040	0,373	0,899	0,009	1,340	0,138	0,012	0,177	0,334	0,010	0,189
2,3	0,340	0,044	0,329	0,967	0,008	1,423	0,144	0,011	0,193	0,483	0,011	0,218
2,35	0,199	0,046	0,294	1,005	0,009	1,500	0,114	0,010	0,166	0,488	0,011	0,244
2,4	0,202	0,048	0,284	1,066	0,012	1,573	0,098	0,009	0,173	0,460	0,010	0,238
2,45	0,207	0,053	0,278	1,124	0,015	1,710	0,096	0,009	0,201	0,446	0,010	0,252
2,5	0,240	0,064	0,315	1,305	0,021	1,867	0,094	0,009	0,229	0,458	0,010	0,260
2,55	0,338	0,079	0,362	1,356	0,024	1,918	0,123	0,009	0,300	0,590	0,010	0,326
2,6	0,239	0,048	0,209	0,834	0,015	1,194	0,083	0,009	0,257	0,476	0,008	0,250
2,65	0,219	0,032	0,212	0,661	0,009	1,021	0,069	0,008	0,244	0,459	0,008	0,251
2,7	0,195	0,026	0,218	0,625	0,008	0,960	0,057	0,008	0,222	0,446	0,007	0,257
2,75	0,156	0,024	0,210	0,599	0,006	0,921	0,046	0,008	0,169	0,348	0,007	0,199
2,8	0,164	0,047	0,332	1,166	0,006	1,731	0,052	0,014	0,192	0,357	0,012	0,185

Tabela A.3 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC3

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,357	0,462	0,110	0,415	0,322	0,821	0,100	0,190	0,407	0,312	0,371	0,448
2,15	0,667	0,790	0,188	0,740	0,551	1,542	0,174	0,414	0,774	0,607	0,640	0,888
2,2	0,381	0,513	0,133	0,460	0,365	0,871	0,097	0,192	0,421	0,333	0,423	0,466
2,25	0,382	0,505	0,148	0,477	0,370	0,893	0,096	0,199	0,436	0,358	0,421	0,497
2,3	0,373	0,556	0,125	0,533	0,401	0,936	0,104	0,214	0,445	0,315	0,459	0,457
2,35	0,392	0,610	0,131	0,577	0,454	0,983	0,114	0,227	0,433	0,305	0,509	0,453
2,4	0,398	0,650	0,157	0,606	0,499	1,058	0,129	0,257	0,436	0,303	0,547	0,450
2,45	0,389	0,676	0,198	0,691	0,536	1,145	0,153	0,309	0,442	0,300	0,576	0,444
2,5	0,490	0,802	0,241	1,107	0,583	1,913	0,218	0,429	0,727	0,583	0,655	0,872
2,55	0,451	0,658	0,278	1,120	0,558	1,540	0,226	0,441	0,489	0,315	0,569	0,464
2,6	0,410	0,721	0,235	0,612	0,632	0,865	0,244	0,497	0,504	0,297	0,651	0,438
2,65	0,400	0,870	0,216	0,462	0,786	0,687	0,285	0,637	0,521	0,286	0,806	0,422
2,7	0,342	0,924	0,210	0,390	0,869	0,636	0,321	0,764	0,527	0,308	0,866	0,410
2,75	0,314	1,033	0,178	0,367	1,011	0,606	0,375	0,934	0,473	0,321	0,991	0,413
2,8	0,459	0,986	0,140	0,520	0,952	1,108	0,342	0,855	0,470	0,457	0,953	0,674

Tabela A.4 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC4

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,866	0,092	0,350	0,327	0,005	0,831	0,254	0,001	0,333	0,330	0,012	0,537
2,15	1,495	0,174	0,667	0,491	0,009	1,551	0,347	0,002	0,599	0,435	0,022	1,008
2,2	1,021	0,092	0,358	0,511	0,007	0,886	0,399	0,001	0,374	0,529	0,012	0,544
2,25	0,970	0,096	0,338	0,716	0,008	0,908	0,471	0,002	0,345	0,665	0,012	0,547
2,3	0,695	0,097	0,320	0,761	0,009	0,966	0,444	0,002	0,257	0,863	0,012	0,572
2,35	0,589	0,099	0,318	0,817	0,010	1,012	0,322	0,002	0,255	0,750	0,012	0,553
2,4	0,583	0,099	0,315	0,799	0,013	1,098	0,250	0,002	0,252	0,645	0,012	0,556
2,45	0,576	0,101	0,341	0,922	0,016	1,225	0,210	0,002	0,254	0,579	0,012	0,566
2,5	0,637	0,100	0,451	0,963	0,022	1,365	0,183	0,003	0,261	0,587	0,013	0,604
2,55	0,720	0,115	0,539	1,174	0,027	1,661	0,160	0,003	0,311	0,474	0,014	0,603
2,6	0,723	0,079	0,476	0,633	0,016	0,876	0,116	0,002	0,305	0,508	0,013	0,574
2,65	0,615	0,077	0,399	0,391	0,010	0,689	0,124	0,002	0,272	0,434	0,012	0,534
2,7	0,564	0,074	0,346	0,367	0,009	0,645	0,092	0,001	0,253	0,448	0,011	0,519
2,75	0,486	0,070	0,298	0,292	0,007	0,618	0,086	0,001	0,211	0,414	0,010	0,496
2,8	0,893	0,132	0,448	0,435	0,007	1,157	0,131	0,001	0,378	0,457	0,017	0,790

Tabela A.5 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC5

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,576	0,093	0,297	0,336	0,004	0,807	0,032	0,002	0,391	0,343	0,011	0,556
2,15	1,088	0,179	0,538	0,621	0,008	1,535	0,048	0,003	0,753	0,686	0,022	1,066
2,2	0,582	0,097	0,324	0,370	0,006	0,857	0,055	0,002	0,400	0,429	0,012	0,605
2,25	0,575	0,105	0,350	0,387	0,007	0,878	0,061	0,003	0,429	0,457	0,012	0,666
2,3	0,551	0,103	0,258	0,431	0,008	0,928	0,068	0,002	0,421	0,364	0,011	0,586
2,35	0,556	0,103	0,250	0,473	0,009	0,971	0,063	0,002	0,413	0,346	0,011	0,561
2,4	0,575	0,099	0,282	0,535	0,011	1,043	0,059	0,002	0,418	0,344	0,011	0,558
2,45	0,632	0,101	0,318	0,600	0,015	1,155	0,061	0,003	0,428	0,340	0,011	0,558
2,5	1,126	0,183	0,577	1,021	0,024	1,989	0,074	0,004	0,787	0,633	0,022	1,067
2,55	0,886	0,104	0,528	1,094	0,028	1,607	0,091	0,003	0,541	0,428	0,013	0,581
2,6	0,792	0,082	0,447	0,515	0,014	0,824	0,057	0,003	0,478	0,371	0,012	0,563
2,65	0,723	0,080	0,399	0,318	0,009	0,669	0,052	0,002	0,459	0,361	0,011	0,538
2,7	0,649	0,076	0,354	0,262	0,008	0,628	0,051	0,002	0,425	0,434	0,011	0,540
2,75	0,522	0,074	0,269	0,230	0,006	0,602	0,046	0,002	0,342	0,441	0,010	0,562
2,8	0,745	0,138	0,342	0,458	0,006	1,125	0,039	0,002	0,539	0,518	0,017	0,835

Tabela A.6 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC6

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,75	0,217	0,767	0,197	0,509	0,799	0,707	0,361	0,809	0,341	0,174	0,750	0,103

Tabela A.7 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC1 com AMS

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,105	0,254	0,042	0,770	0,228	1,052	0,121	0,197	0,142	0,295	0,227	0,260
2,15	0,186	0,477	0,067	1,440	0,448	1,963	0,202	0,353	0,241	0,532	0,476	0,509
2,2	0,135	0,295	0,050	0,828	0,263	1,132	0,137	0,197	0,144	0,300	0,259	0,267
2,25	0,151	0,300	0,047	0,888	0,274	1,189	0,134	0,213	0,147	0,319	0,261	0,282
2,3	0,135	0,322	0,046	0,945	0,290	1,259	0,133	0,230	0,158	0,370	0,284	0,288
2,35	0,108	0,366	0,053	0,985	0,330	1,334	0,137	0,244	0,164	0,372	0,320	0,287
2,4	0,124	0,405	0,058	1,061	0,368	1,469	0,140	0,268	0,168	0,360	0,354	0,288
2,45	0,144	0,436	0,072	1,154	0,401	1,561	0,141	0,307	0,166	0,350	0,383	0,287
2,5	0,168	0,454	0,093	1,012	0,425	1,337	0,149	0,345	0,180	0,347	0,405	0,288
2,55	0,213	0,466	0,130	0,918	0,445	1,174	0,166	0,378	0,214	0,364	0,419	0,292
2,6	0,226	0,500	0,159	0,773	0,493	0,989	0,190	0,427	0,262	0,366	0,482	0,293
2,65	0,230	0,648	0,167	0,655	0,632	0,862	0,227	0,537	0,292	0,368	0,628	0,297
2,7	0,190	0,698	0,158	0,566	0,705	0,800	0,274	0,657	0,300	0,344	0,676	0,286
2,75	0,152	0,810	0,128	0,541	0,829	0,765	0,315	0,803	0,285	0,275	0,792	0,234
2,8	0,174	0,788	0,086	0,985	0,795	1,398	0,315	0,760	0,199	0,392	0,772	0,352

Tabela A.8 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC2 com AMS

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,172	0,036	0,202	0,842	0,022	1,234	0,071	0,009	0,153	0,298	0,008	0,159
2,15	0,227	0,063	0,354	1,615	0,042	2,357	0,097	0,017	0,268	0,484	0,015	0,290
2,2	0,288	0,039	0,273	0,906	0,024	1,310	0,119	0,010	0,158	0,308	0,009	0,170
2,25	0,419	0,041	0,373	0,920	0,025	1,376	0,139	0,012	0,176	0,335	0,011	0,190
2,3	0,343	0,043	0,329	0,978	0,026	1,456	0,147	0,012	0,192	0,486	0,011	0,220
2,35	0,199	0,045	0,289	1,026	0,028	1,533	0,114	0,011	0,167	0,491	0,011	0,243
2,4	0,198	0,046	0,273	1,052	0,030	1,620	0,099	0,010	0,185	0,461	0,010	0,245
2,45	0,201	0,051	0,254	1,143	0,032	1,690	0,091	0,009	0,201	0,462	0,010	0,253
2,5	0,212	0,048	0,263	0,986	0,028	1,470	0,091	0,009	0,229	0,455	0,010	0,260
2,55	0,233	0,045	0,232	0,857	0,025	1,262	0,088	0,009	0,242	0,466	0,009	0,256
2,6	0,213	0,040	0,201	0,723	0,021	1,086	0,080	0,009	0,244	0,465	0,008	0,244
2,65	0,222	0,031	0,202	0,655	0,019	1,007	0,068	0,008	0,241	0,458	0,008	0,247
2,7	0,192	0,024	0,217	0,630	0,017	0,970	0,058	0,008	0,224	0,448	0,007	0,256
2,75	0,154	0,023	0,211	0,604	0,017	0,930	0,045	0,008	0,169	0,349	0,007	0,199
2,8	0,160	0,045	0,328	1,163	0,031	1,735	0,050	0,014	0,193	0,358	0,012	0,186

Tabela A.9 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC3 com AMS

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,266	0,332	0,190	0,396	0,275	0,629	0,100	0,202	0,256	0,111	0,279	0,162
2,15	0,510	0,563	0,365	0,685	0,513	1,136	0,184	0,416	0,473	0,166	0,542	0,293
2,2	0,305	0,382	0,197	0,438	0,316	0,683	0,097	0,202	0,270	0,114	0,328	0,168
2,25	0,326	0,387	0,214	0,461	0,332	0,710	0,111	0,219	0,278	0,123	0,335	0,179
2,3	0,337	0,422	0,220	0,509	0,347	0,763	0,123	0,245	0,295	0,099	0,360	0,162
2,35	0,356	0,475	0,221	0,542	0,397	0,811	0,133	0,268	0,309	0,081	0,409	0,150
2,4	0,351	0,521	0,219	0,571	0,446	0,924	0,140	0,297	0,316	0,085	0,455	0,144
2,45	0,305	0,558	0,213	0,645	0,488	1,016	0,149	0,339	0,305	0,088	0,495	0,142
2,5	0,436	0,611	0,354	0,843	0,522	1,299	0,192	0,421	0,460	0,122	0,532	0,261
2,55	0,329	0,587	0,267	0,763	0,533	1,005	0,212	0,429	0,325	0,151	0,528	0,163
2,6	0,287	0,603	0,262	0,492	0,588	0,640	0,253	0,536	0,333	0,112	0,560	0,134
2,65	0,301	0,757	0,285	0,437	0,741	0,518	0,298	0,666	0,371	0,134	0,721	0,136
2,7	0,260	0,836	0,288	0,376	0,839	0,467	0,336	0,790	0,399	0,158	0,805	0,166
2,75	0,240	0,973	0,243	0,348	0,989	0,437	0,384	0,952	0,377	0,142	0,949	0,173
2,8	0,363	0,949	0,223	0,465	0,942	0,775	0,348	0,866	0,299	0,115	0,928	0,227

Tabela A.10 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC4 com AMS

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,417	0,037	0,092	0,411	0,015	0,711	0,243	0,003	0,162	0,412	0,001	0,078
2,15	0,609	0,068	0,163	0,516	0,028	1,302	0,327	0,006	0,254	0,601	0,002	0,131
2,2	0,605	0,040	0,102	0,525	0,016	0,770	0,390	0,003	0,215	0,629	0,001	0,119
2,25	0,698	0,042	0,104	0,727	0,016	0,811	0,465	0,003	0,231	0,684	0,002	0,110
2,3	0,658	0,045	0,097	0,840	0,017	0,862	0,442	0,004	0,213	0,632	0,001	0,081
2,35	0,474	0,048	0,078	0,923	0,018	0,927	0,321	0,004	0,153	0,478	0,001	0,071
2,4	0,379	0,052	0,083	0,958	0,019	1,046	0,248	0,004	0,126	0,372	0,001	0,059
2,45	0,327	0,054	0,091	0,933	0,020	1,136	0,198	0,003	0,115	0,313	0,001	0,056
2,5	0,309	0,050	0,109	0,850	0,019	1,003	0,170	0,003	0,111	0,283	0,001	0,075
2,55	0,359	0,061	0,172	0,924	0,022	1,126	0,149	0,004	0,151	0,336	0,001	0,118
2,6	0,271	0,039	0,133	0,562	0,015	0,693	0,111	0,003	0,107	0,271	0,001	0,085
2,65	0,232	0,030	0,128	0,422	0,013	0,583	0,125	0,003	0,109	0,231	0,001	0,089
2,7	0,200	0,029	0,119	0,354	0,012	0,536	0,093	0,003	0,102	0,220	0,001	0,099
2,75	0,160	0,027	0,085	0,307	0,011	0,512	0,085	0,002	0,081	0,167	0,001	0,077
2,8	0,241	0,053	0,092	0,540	0,021	0,948	0,124	0,004	0,116	0,200	0,001	0,047

Tabela A.11 – Deslocamentos máximos nos quatro pontos estudados - MC5 com AMS

Frequência (Hz)	Deslocamentos (mm)											
	Ponto1			Ponto2			Ponto3			Ponto 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,1	0,407	0,049	0,293	0,309	0,019	0,580	0,037	0,009	0,239	0,141	0,006	0,113
2,15	0,753	0,093	0,562	0,567	0,037	1,073	0,056	0,017	0,456	0,212	0,012	0,181
2,2	0,410	0,053	0,295	0,372	0,020	0,634	0,055	0,009	0,242	0,196	0,008	0,156
2,25	0,432	0,059	0,311	0,367	0,021	0,661	0,059	0,010	0,253	0,226	0,008	0,151
2,3	0,467	0,060	0,320	0,404	0,022	0,714	0,055	0,010	0,264	0,185	0,008	0,123
2,35	0,464	0,063	0,327	0,436	0,023	0,758	0,043	0,010	0,268	0,149	0,007	0,112
2,4	0,464	0,063	0,331	0,479	0,024	0,857	0,041	0,010	0,272	0,162	0,007	0,117
2,45	0,485	0,064	0,343	0,590	0,024	0,973	0,044	0,010	0,281	0,174	0,007	0,121
2,5	0,866	0,096	0,620	0,753	0,038	1,269	0,059	0,018	0,501	0,240	0,012	0,154
2,55	0,656	0,064	0,470	0,691	0,025	0,983	0,075	0,010	0,376	0,367	0,007	0,220
2,6	0,545	0,044	0,390	0,394	0,018	0,589	0,051	0,009	0,312	0,268	0,006	0,158
2,65	0,538	0,042	0,387	0,296	0,016	0,479	0,048	0,009	0,311	0,285	0,006	0,178
2,7	0,513	0,040	0,368	0,226	0,015	0,427	0,046	0,008	0,298	0,314	0,006	0,210
2,75	0,400	0,038	0,286	0,201	0,015	0,409	0,032	0,007	0,233	0,247	0,006	0,183
2,8	0,532	0,075	0,387	0,384	0,027	0,742	0,027	0,012	0,316	0,120	0,010	0,113

Tabela A.12 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC1

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,035	0,018	0,029	0,063	0,033	0,053	0,109	0,056	0,118
2,15	0,051	0,021	0,041	0,088	0,037	0,072	0,163	0,104	0,163
2,20	0,078	0,024	0,062	0,136	0,043	0,108	0,179	0,073	0,197
2,25	0,103	0,029	0,078	0,182	0,052	0,138	0,248	0,092	0,257
2,30	0,081	0,040	0,054	0,140	0,070	0,095	0,182	0,117	0,185
2,35	0,049	0,052	0,031	0,088	0,094	0,063	0,155	0,138	0,170
2,40	0,042	0,057	0,035	0,081	0,104	0,067	0,156	0,158	0,161
2,45	0,056	0,062	0,052	0,105	0,111	0,100	0,163	0,171	0,218
2,50	0,085	0,062	0,068	0,165	0,122	0,133	0,256	0,215	0,282
2,55	0,123	0,067	0,081	0,227	0,132	0,150	0,343	0,228	0,316
2,60	0,099	0,062	0,053	0,179	0,113	0,095	0,260	0,168	0,209
2,65	0,077	0,062	0,039	0,138	0,111	0,072	0,193	0,161	0,161
2,70	0,070	0,079	0,035	0,121	0,138	0,062	0,158	0,179	0,127
2,75	0,047	0,083	0,026	0,083	0,149	0,046	0,124	0,215	0,100
2,80	0,028	0,074	0,020	0,051	0,134	0,040	0,123	0,193	0,131

Tabela A.13 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC1

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,094	0,013	0,104	0,165	0,024	0,181	0,253	0,040	0,360
2,15	0,106	0,014	0,116	0,184	0,027	0,199	0,430	0,091	0,636
2,20	0,120	0,017	0,130	0,211	0,030	0,225	0,333	0,054	0,456
2,25	0,141	0,020	0,151	0,254	0,037	0,264	0,378	0,067	0,506
2,30	0,162	0,027	0,173	0,293	0,049	0,304	0,462	0,087	0,607
2,35	0,190	0,035	0,204	0,338	0,064	0,354	0,526	0,103	0,691
2,40	0,234	0,039	0,248	0,412	0,073	0,429	0,616	0,126	0,804
2,45	0,297	0,046	0,308	0,516	0,085	0,529	0,712	0,139	0,945
2,50	0,366	0,053	0,364	0,637	0,102	0,629	0,837	0,177	1,075
2,55	0,453	0,062	0,436	0,775	0,118	0,742	1,018	0,192	1,269
2,60	0,283	0,058	0,262	0,493	0,107	0,456	0,657	0,163	0,831
2,65	0,162	0,060	0,147	0,291	0,107	0,266	0,438	0,144	0,552
2,70	0,115	0,079	0,107	0,212	0,140	0,200	0,335	0,180	0,443
2,75	0,077	0,086	0,078	0,143	0,154	0,146	0,245	0,219	0,342
2,80	0,082	0,079	0,087	0,164	0,142	0,174	0,335	0,199	0,489

Tabela A.14 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC1

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,009	0,016	0,014	0,018	0,030	0,026	0,027	0,048	0,058
2,15	0,011	0,017	0,015	0,021	0,033	0,027	0,054	0,090	0,098
2,20	0,013	0,019	0,017	0,025	0,036	0,030	0,038	0,066	0,069
2,25	0,014	0,021	0,020	0,027	0,040	0,038	0,042	0,075	0,080
2,30	0,012	0,023	0,022	0,023	0,044	0,042	0,038	0,083	0,085
2,35	0,011	0,025	0,026	0,022	0,050	0,046	0,040	0,092	0,101
2,40	0,014	0,031	0,033	0,027	0,060	0,059	0,041	0,107	0,123
2,45	0,022	0,038	0,035	0,040	0,070	0,065	0,064	0,119	0,140
2,50	0,030	0,044	0,031	0,054	0,081	0,060	0,083	0,132	0,136
2,55	0,039	0,051	0,048	0,072	0,095	0,085	0,105	0,158	0,171
2,60	0,031	0,051	0,049	0,058	0,094	0,095	0,090	0,152	0,202
2,65	0,027	0,056	0,042	0,053	0,100	0,083	0,079	0,144	0,187
2,70	0,034	0,077	0,041	0,063	0,138	0,079	0,091	0,191	0,164
2,75	0,036	0,087	0,031	0,066	0,157	0,059	0,097	0,233	0,120
2,80	0,034	0,084	0,020	0,061	0,152	0,036	0,090	0,215	0,077

Tabela A.15 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC1

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,021	0,014	0,012	0,039	0,026	0,022	0,067	0,044	0,051
2,15	0,023	0,015	0,014	0,043	0,029	0,026	0,121	0,098	0,093
2,20	0,027	0,018	0,016	0,051	0,033	0,031	0,078	0,063	0,067
2,25	0,028	0,023	0,015	0,054	0,042	0,029	0,097	0,080	0,080
2,30	0,038	0,032	0,025	0,071	0,059	0,046	0,120	0,103	0,095
2,35	0,045	0,042	0,035	0,087	0,077	0,063	0,144	0,122	0,131
2,40	0,044	0,045	0,035	0,085	0,085	0,064	0,136	0,147	0,127
2,45	0,045	0,051	0,034	0,087	0,096	0,063	0,147	0,161	0,130
2,50	0,053	0,059	0,037	0,098	0,117	0,067	0,159	0,208	0,136
2,55	0,074	0,073	0,044	0,136	0,137	0,080	0,223	0,219	0,169
2,60	0,069	0,063	0,039	0,123	0,120	0,071	0,175	0,178	0,137
2,65	0,065	0,061	0,034	0,116	0,112	0,062	0,176	0,164	0,130
2,70	0,070	0,077	0,036	0,123	0,136	0,065	0,169	0,177	0,121
2,75	0,050	0,082	0,026	0,089	0,147	0,047	0,124	0,215	0,092
2,80	0,026	0,074	0,014	0,046	0,134	0,026	0,072	0,196	0,066

Tabela A.16 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC2

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,047	0,004	0,038	0,086	0,008	0,068	0,141	0,017	0,147
2,15	0,070	0,005	0,055	0,123	0,010	0,097	0,272	0,027	0,230
2,20	0,118	0,006	0,090	0,204	0,012	0,156	0,276	0,021	0,285
2,25	0,172	0,007	0,129	0,304	0,014	0,229	0,432	0,024	0,426
2,30	0,140	0,010	0,100	0,243	0,019	0,174	0,327	0,029	0,323
2,35	0,086	0,012	0,054	0,153	0,022	0,102	0,260	0,036	0,242
2,40	0,080	0,015	0,050	0,146	0,026	0,096	0,260	0,042	0,226
2,45	0,092	0,019	0,067	0,166	0,034	0,122	0,268	0,049	0,244
2,50	0,118	0,025	0,082	0,220	0,045	0,153	0,331	0,065	0,295
2,55	0,138	0,031	0,084	0,261	0,054	0,159	0,438	0,078	0,359
2,60	0,105	0,019	0,056	0,197	0,035	0,101	0,294	0,053	0,224
2,65	0,090	0,011	0,048	0,164	0,021	0,088	0,256	0,034	0,203
2,70	0,093	0,008	0,049	0,164	0,015	0,088	0,228	0,024	0,169
2,75	0,069	0,005	0,039	0,121	0,009	0,069	0,193	0,017	0,150
2,80	0,039	0,005	0,026	0,073	0,010	0,053	0,173	0,020	0,163

Tabela A.17 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC2

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,095	0,002	0,105	0,164	0,003	0,180	0,249	0,005	0,358
2,15	0,109	0,002	0,118	0,187	0,004	0,201	0,408	0,008	0,612
2,20	0,128	0,003	0,136	0,226	0,006	0,235	0,332	0,009	0,462
2,25	0,153	0,004	0,160	0,286	0,007	0,288	0,415	0,011	0,539
2,30	0,169	0,003	0,177	0,315	0,006	0,322	0,480	0,008	0,641
2,35	0,190	0,003	0,202	0,344	0,006	0,357	0,556	0,009	0,733
2,40	0,231	0,004	0,244	0,407	0,007	0,422	0,625	0,010	0,816
2,45	0,303	0,006	0,315	0,526	0,011	0,542	0,715	0,015	0,972
2,50	0,378	0,009	0,382	0,662	0,016	0,665	0,892	0,022	1,166
2,55	0,454	0,011	0,446	0,780	0,019	0,762	0,974	0,026	1,229
2,60	0,258	0,007	0,244	0,448	0,012	0,426	0,604	0,017	0,798
2,65	0,144	0,004	0,133	0,256	0,007	0,242	0,380	0,010	0,500
2,70	0,102	0,003	0,100	0,188	0,005	0,189	0,305	0,009	0,437
2,75	0,066	0,002	0,076	0,126	0,003	0,143	0,232	0,006	0,336
2,80	0,080	0,002	0,089	0,167	0,004	0,178	0,368	0,007	0,508

Tabela A.18 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC2

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,007	0,001	0,011	0,013	0,002	0,021	0,023	0,004	0,044
2,15	0,009	0,002	0,012	0,017	0,003	0,022	0,036	0,006	0,080
2,20	0,012	0,003	0,014	0,023	0,005	0,026	0,038	0,007	0,066
2,25	0,016	0,004	0,021	0,029	0,006	0,040	0,049	0,009	0,090
2,30	0,014	0,003	0,025	0,026	0,005	0,049	0,040	0,007	0,106
2,35	0,013	0,002	0,024	0,024	0,003	0,043	0,034	0,006	0,093
2,40	0,014	0,001	0,025	0,026	0,003	0,044	0,039	0,004	0,081
2,45	0,018	0,001	0,026	0,032	0,002	0,050	0,047	0,004	0,116
2,50	0,025	0,001	0,033	0,043	0,002	0,063	0,056	0,004	0,145
2,55	0,034	0,001	0,055	0,061	0,003	0,100	0,094	0,004	0,220
2,60	0,025	0,001	0,050	0,045	0,002	0,090	0,062	0,004	0,176
2,65	0,019	0,001	0,045	0,035	0,002	0,080	0,053	0,003	0,166
2,70	0,018	0,001	0,046	0,032	0,002	0,080	0,043	0,003	0,149
2,75	0,012	0,001	0,032	0,022	0,002	0,056	0,031	0,003	0,099
2,80	0,007	0,001	0,016	0,013	0,002	0,029	0,027	0,004	0,056

Tabela A.19 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC2

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,035	0,001	0,016	0,064	0,002	0,031	0,118	0,004	0,081
2,15	0,038	0,002	0,018	0,069	0,003	0,035	0,213	0,005	0,179
2,20	0,045	0,002	0,023	0,083	0,004	0,045	0,141	0,006	0,108
2,25	0,051	0,003	0,024	0,098	0,006	0,047	0,173	0,008	0,134
2,30	0,080	0,003	0,049	0,147	0,005	0,089	0,246	0,008	0,187
2,35	0,087	0,003	0,061	0,165	0,005	0,110	0,278	0,007	0,226
2,40	0,085	0,002	0,062	0,165	0,005	0,112	0,267	0,007	0,222
2,45	0,092	0,002	0,063	0,178	0,004	0,115	0,306	0,007	0,238
2,50	0,112	0,002	0,073	0,212	0,005	0,133	0,327	0,007	0,261
2,55	0,148	0,002	0,086	0,274	0,004	0,158	0,443	0,007	0,335
2,60	0,129	0,001	0,072	0,231	0,003	0,133	0,336	0,005	0,269
2,65	0,120	0,001	0,063	0,215	0,002	0,115	0,319	0,004	0,238
2,70	0,131	0,001	0,067	0,232	0,002	0,120	0,321	0,003	0,226
2,75	0,095	0,001	0,049	0,170	0,002	0,088	0,239	0,003	0,166
2,80	0,049	0,001	0,026	0,088	0,002	0,048	0,144	0,004	0,107

Tabela A.20 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC3

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,033	0,026	0,014	0,062	0,046	0,027	0,100	0,070	0,061
2,15	0,035	0,030	0,015	0,064	0,052	0,028	0,149	0,131	0,097
2,20	0,040	0,035	0,023	0,075	0,060	0,042	0,117	0,093	0,089
2,25	0,058	0,040	0,037	0,106	0,070	0,067	0,167	0,112	0,136
2,30	0,065	0,052	0,027	0,116	0,090	0,048	0,170	0,137	0,095
2,35	0,059	0,067	0,019	0,103	0,122	0,038	0,163	0,178	0,094
2,40	0,061	0,072	0,032	0,105	0,132	0,059	0,175	0,199	0,124
2,45	0,070	0,072	0,053	0,127	0,127	0,097	0,202	0,185	0,202
2,50	0,096	0,067	0,069	0,169	0,125	0,125	0,307	0,262	0,289
2,55	0,131	0,068	0,072	0,245	0,129	0,138	0,392	0,211	0,303
2,60	0,111	0,069	0,054	0,212	0,124	0,105	0,321	0,187	0,218
2,65	0,088	0,073	0,041	0,162	0,129	0,079	0,259	0,186	0,170
2,70	0,082	0,094	0,039	0,143	0,164	0,071	0,194	0,212	0,133
2,75	0,056	0,100	0,028	0,096	0,178	0,049	0,162	0,256	0,097
2,80	0,038	0,090	0,017	0,071	0,161	0,032	0,139	0,239	0,090

Tabela A.21 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC3

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,051	0,016	0,070	0,095	0,030	0,125	0,148	0,051	0,244
2,15	0,058	0,018	0,079	0,104	0,033	0,136	0,252	0,113	0,430
2,20	0,067	0,021	0,088	0,118	0,038	0,151	0,201	0,063	0,295
2,25	0,078	0,025	0,103	0,135	0,045	0,173	0,224	0,080	0,320
2,30	0,094	0,033	0,120	0,164	0,059	0,203	0,261	0,101	0,376
2,35	0,116	0,042	0,145	0,202	0,077	0,246	0,312	0,117	0,460
2,40	0,150	0,047	0,177	0,260	0,087	0,303	0,384	0,138	0,552
2,45	0,197	0,051	0,220	0,341	0,093	0,377	0,466	0,149	0,644
2,50	0,248	0,055	0,258	0,433	0,103	0,445	0,689	0,217	0,939
2,55	0,419	0,064	0,403	0,734	0,123	0,701	0,960	0,197	1,222
2,60	0,205	0,064	0,186	0,357	0,114	0,325	0,469	0,175	0,601
2,65	0,121	0,070	0,106	0,216	0,124	0,192	0,314	0,166	0,399
2,70	0,088	0,094	0,077	0,158	0,166	0,144	0,236	0,212	0,322
2,75	0,056	0,102	0,055	0,103	0,184	0,105	0,162	0,261	0,245
2,80	0,053	0,095	0,061	0,106	0,170	0,118	0,182	0,243	0,310

Tabela A.22 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC3

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,008	0,021	0,028	0,015	0,039	0,048	0,025	0,061	0,094
2,15	0,008	0,021	0,030	0,016	0,038	0,052	0,046	0,106	0,177
2,20	0,010	0,021	0,034	0,019	0,038	0,060	0,032	0,066	0,121
2,25	0,011	0,022	0,037	0,022	0,041	0,069	0,035	0,078	0,138
2,30	0,010	0,023	0,036	0,019	0,045	0,066	0,035	0,088	0,127
2,35	0,010	0,026	0,042	0,021	0,051	0,072	0,039	0,098	0,138
2,40	0,014	0,032	0,055	0,026	0,063	0,097	0,043	0,115	0,188
2,45	0,021	0,041	0,059	0,038	0,076	0,108	0,059	0,125	0,205
2,50	0,025	0,047	0,048	0,046	0,085	0,089	0,103	0,148	0,230
2,55	0,036	0,061	0,060	0,068	0,112	0,114	0,118	0,173	0,240
2,60	0,031	0,061	0,055	0,058	0,108	0,110	0,086	0,166	0,236
2,65	0,032	0,068	0,050	0,060	0,124	0,099	0,091	0,173	0,226
2,70	0,041	0,093	0,049	0,075	0,168	0,095	0,110	0,230	0,204
2,75	0,043	0,104	0,039	0,079	0,188	0,072	0,123	0,282	0,146
2,80	0,039	0,100	0,027	0,070	0,179	0,048	0,098	0,252	0,106

Tabela A.23 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC3

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,057	0,019	0,050	0,099	0,035	0,089	0,135	0,060	0,156
2,15	0,056	0,022	0,048	0,100	0,040	0,087	0,208	0,125	0,268
2,20	0,075	0,026	0,060	0,132	0,046	0,108	0,178	0,077	0,196
2,25	0,080	0,031	0,062	0,144	0,056	0,114	0,219	0,097	0,239
2,30	0,044	0,042	0,039	0,082	0,075	0,076	0,132	0,122	0,165
2,35	0,031	0,054	0,040	0,061	0,099	0,074	0,123	0,141	0,172
2,40	0,036	0,057	0,049	0,069	0,106	0,091	0,133	0,162	0,189
2,45	0,049	0,058	0,058	0,089	0,105	0,108	0,141	0,169	0,206
2,50	0,076	0,059	0,071	0,132	0,113	0,128	0,275	0,247	0,379
2,55	0,077	0,069	0,066	0,138	0,130	0,119	0,246	0,206	0,246
2,60	0,079	0,064	0,066	0,147	0,116	0,117	0,242	0,173	0,229
2,65	0,065	0,069	0,047	0,123	0,122	0,087	0,200	0,167	0,192
2,70	0,076	0,090	0,049	0,132	0,159	0,086	0,176	0,205	0,179
2,75	0,065	0,098	0,045	0,115	0,175	0,082	0,173	0,250	0,169
2,80	0,038	0,089	0,034	0,072	0,161	0,067	0,123	0,226	0,178

Tabela A.24 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC4

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,068	0,010	0,024	0,117	0,016	0,042	0,153	0,023	0,086
2,15	0,075	0,011	0,025	0,130	0,018	0,043	0,311	0,043	0,198
2,20	0,079	0,012	0,025	0,141	0,020	0,045	0,199	0,026	0,104
2,25	0,080	0,013	0,026	0,147	0,022	0,047	0,227	0,029	0,121
2,30	0,082	0,014	0,031	0,153	0,023	0,056	0,250	0,034	0,142
2,35	0,088	0,016	0,036	0,164	0,027	0,066	0,284	0,038	0,170
2,40	0,105	0,019	0,048	0,193	0,033	0,089	0,360	0,046	0,224
2,45	0,144	0,024	0,087	0,256	0,042	0,152	0,428	0,058	0,296
2,50	0,204	0,029	0,128	0,368	0,052	0,233	0,530	0,075	0,463
2,55	0,223	0,033	0,131	0,419	0,061	0,250	0,673	0,093	0,545
2,60	0,187	0,021	0,105	0,351	0,040	0,198	0,541	0,064	0,417
2,65	0,121	0,012	0,065	0,231	0,024	0,125	0,374	0,041	0,282
2,70	0,100	0,010	0,053	0,183	0,019	0,097	0,271	0,034	0,206
2,75	0,064	0,008	0,034	0,115	0,015	0,061	0,195	0,026	0,151
2,80	0,059	0,009	0,031	0,117	0,017	0,063	0,217	0,032	0,162

Tabela A.25 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC4

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,056	0,001	0,073	0,098	0,002	0,130	0,157	0,004	0,270
2,15	0,067	0,001	0,082	0,118	0,002	0,145	0,238	0,009	0,457
2,20	0,081	0,002	0,092	0,147	0,003	0,161	0,223	0,006	0,329
2,25	0,095	0,002	0,106	0,176	0,004	0,183	0,275	0,007	0,351
2,30	0,114	0,002	0,125	0,207	0,005	0,213	0,302	0,009	0,405
2,35	0,139	0,003	0,150	0,252	0,006	0,255	0,359	0,011	0,452
2,40	0,172	0,004	0,187	0,310	0,008	0,317	0,461	0,014	0,562
2,45	0,231	0,007	0,245	0,408	0,012	0,420	0,589	0,019	0,715
2,50	0,300	0,009	0,305	0,524	0,018	0,523	0,728	0,026	0,868
2,55	0,422	0,011	0,410	0,736	0,021	0,710	0,989	0,032	1,275
2,60	0,219	0,007	0,201	0,378	0,013	0,352	0,486	0,020	0,664
2,65	0,122	0,004	0,109	0,212	0,007	0,198	0,291	0,011	0,402
2,70	0,088	0,003	0,080	0,156	0,005	0,151	0,248	0,009	0,343
2,75	0,054	0,002	0,057	0,102	0,003	0,109	0,187	0,006	0,259
2,80	0,059	0,002	0,066	0,118	0,004	0,129	0,209	0,008	0,331

Tabela A.26 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC4

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,019	0,000	0,021	0,033	0,000	0,035	0,044	0,001	0,065
2,15	0,025	0,000	0,023	0,043	0,000	0,040	0,055	0,002	0,127
2,20	0,030	0,000	0,025	0,055	0,001	0,045	0,074	0,001	0,090
2,25	0,033	0,000	0,026	0,062	0,001	0,049	0,100	0,001	0,108
2,30	0,033	0,000	0,025	0,060	0,001	0,048	0,099	0,001	0,105
2,35	0,029	0,000	0,027	0,052	0,001	0,052	0,071	0,001	0,116
2,40	0,025	0,001	0,037	0,045	0,001	0,067	0,065	0,002	0,135
2,45	0,023	0,001	0,044	0,044	0,002	0,078	0,069	0,003	0,148
2,50	0,024	0,001	0,043	0,047	0,003	0,079	0,068	0,004	0,159
2,55	0,033	0,001	0,057	0,060	0,002	0,106	0,087	0,004	0,219
2,60	0,021	0,001	0,047	0,037	0,001	0,090	0,054	0,002	0,187
2,65	0,014	0,001	0,037	0,026	0,001	0,070	0,045	0,002	0,151
2,70	0,013	0,000	0,034	0,023	0,001	0,061	0,034	0,001	0,123
2,75	0,009	0,000	0,022	0,016	0,001	0,039	0,026	0,001	0,078
2,80	0,009	0,000	0,016	0,017	0,001	0,032	0,034	0,001	0,091

Tabela A.27 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC4

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,046	0,001	0,046	0,090	0,002	0,079	0,144	0,003	0,170
2,15	0,056	0,001	0,051	0,105	0,002	0,089	0,264	0,006	0,313
2,20	0,070	0,002	0,058	0,127	0,003	0,101	0,204	0,004	0,181
2,25	0,073	0,001	0,058	0,132	0,003	0,102	0,185	0,004	0,193
2,30	0,073	0,002	0,058	0,138	0,003	0,103	0,222	0,005	0,217
2,35	0,077	0,002	0,068	0,142	0,003	0,120	0,205	0,005	0,241
2,40	0,086	0,002	0,088	0,154	0,004	0,155	0,248	0,006	0,274
2,45	0,115	0,003	0,109	0,206	0,005	0,191	0,326	0,007	0,350
2,50	0,161	0,004	0,135	0,286	0,007	0,237	0,406	0,009	0,411
2,55	0,158	0,004	0,131	0,289	0,007	0,234	0,496	0,011	0,478
2,60	0,139	0,003	0,117	0,253	0,006	0,203	0,405	0,009	0,384
2,65	0,089	0,002	0,072	0,170	0,004	0,132	0,290	0,006	0,280
2,70	0,085	0,002	0,062	0,152	0,003	0,113	0,219	0,006	0,246
2,75	0,070	0,001	0,051	0,125	0,002	0,095	0,194	0,004	0,194
2,80	0,054	0,001	0,046	0,104	0,002	0,091	0,193	0,005	0,235

Tabela A.28 – Acelerações no primeiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC5

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,056	0,011	0,025	0,105	0,018	0,050	0,180	0,026	0,121
2,15	0,060	0,013	0,031	0,114	0,022	0,060	0,290	0,048	0,205
2,20	0,073	0,016	0,048	0,141	0,028	0,087	0,221	0,041	0,186
2,25	0,113	0,016	0,080	0,208	0,030	0,144	0,329	0,047	0,285
2,30	0,123	0,014	0,072	0,217	0,025	0,127	0,307	0,039	0,225
2,35	0,105	0,015	0,045	0,185	0,025	0,083	0,300	0,035	0,215
2,40	0,117	0,018	0,051	0,210	0,030	0,097	0,379	0,042	0,259
2,45	0,148	0,022	0,086	0,267	0,038	0,150	0,432	0,054	0,296
2,50	0,207	0,027	0,127	0,378	0,048	0,228	0,662	0,088	0,514
2,55	0,245	0,032	0,131	0,467	0,059	0,250	0,703	0,096	0,509
2,60	0,196	0,020	0,103	0,378	0,038	0,198	0,583	0,063	0,406
2,65	0,149	0,012	0,075	0,280	0,024	0,142	0,460	0,043	0,305
2,70	0,143	0,010	0,073	0,252	0,019	0,128	0,362	0,033	0,232
2,75	0,100	0,008	0,050	0,172	0,016	0,087	0,261	0,024	0,178
2,80	0,067	0,009	0,033	0,128	0,017	0,063	0,232	0,034	0,155

Tabela A.29 – Acelerações no segundo ponto de análise sem o emprego do AMS – MC5

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,045	0,001	0,071	0,084	0,002	0,126	0,139	0,004	0,255
2,15	0,053	0,001	0,079	0,098	0,003	0,140	0,242	0,009	0,447
2,20	0,061	0,002	0,089	0,111	0,003	0,154	0,186	0,005	0,309
2,25	0,072	0,002	0,103	0,126	0,004	0,174	0,209	0,007	0,332
2,30	0,089	0,002	0,119	0,158	0,004	0,204	0,256	0,008	0,381
2,35	0,110	0,003	0,142	0,195	0,005	0,241	0,308	0,009	0,432
2,40	0,144	0,004	0,176	0,253	0,007	0,299	0,389	0,012	0,531
2,45	0,202	0,006	0,231	0,350	0,012	0,395	0,473	0,018	0,683
2,50	0,267	0,009	0,282	0,470	0,017	0,491	0,745	0,031	1,031
2,55	0,444	0,011	0,429	0,783	0,021	0,752	1,025	0,032	1,336
2,60	0,207	0,006	0,186	0,358	0,012	0,324	0,448	0,018	0,612
2,65	0,120	0,003	0,100	0,207	0,006	0,183	0,274	0,010	0,371
2,70	0,086	0,003	0,075	0,148	0,005	0,141	0,207	0,009	0,322
2,75	0,046	0,002	0,054	0,085	0,003	0,104	0,144	0,006	0,245
2,80	0,048	0,002	0,063	0,098	0,004	0,122	0,188	0,007	0,317

Tabela A.30 – Acelerações no terceiro ponto de análise sem o emprego do AMS – MC5

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,007	0,000	0,030	0,013	0,001	0,050	0,022	0,001	0,104
2,15	0,010	0,000	0,034	0,017	0,001	0,058	0,034	0,002	0,179
2,20	0,014	0,001	0,041	0,025	0,001	0,074	0,036	0,002	0,140
2,25	0,017	0,001	0,046	0,031	0,002	0,087	0,044	0,003	0,187
2,30	0,012	0,001	0,039	0,022	0,001	0,075	0,034	0,002	0,155
2,35	0,009	0,000	0,040	0,017	0,001	0,069	0,031	0,002	0,154
2,40	0,010	0,001	0,048	0,017	0,001	0,087	0,028	0,002	0,166
2,45	0,013	0,001	0,054	0,023	0,002	0,103	0,031	0,003	0,196
2,50	0,018	0,001	0,057	0,032	0,003	0,112	0,053	0,005	0,315
2,55	0,035	0,001	0,097	0,062	0,002	0,176	0,086	0,003	0,345
2,60	0,022	0,001	0,071	0,039	0,002	0,133	0,056	0,003	0,270
2,65	0,019	0,001	0,062	0,034	0,001	0,116	0,051	0,002	0,250
2,70	0,020	0,001	0,063	0,035	0,001	0,111	0,046	0,002	0,218
2,75	0,014	0,001	0,044	0,025	0,001	0,078	0,035	0,002	0,138
2,80	0,007	0,000	0,028	0,013	0,001	0,052	0,024	0,001	0,127

Tabela A.31 – Acelerações no quarto ponto de análise sem o emprego do AMS – MC5

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,076	0,001	0,063	0,133	0,002	0,111	0,215	0,003	0,229
2,15	0,102	0,002	0,081	0,176	0,003	0,141	0,349	0,007	0,389
2,20	0,142	0,002	0,108	0,248	0,004	0,190	0,319	0,005	0,341
2,25	0,146	0,001	0,105	0,259	0,003	0,190	0,364	0,004	0,387
2,30	0,076	0,001	0,055	0,131	0,002	0,105	0,232	0,004	0,226
2,35	0,039	0,002	0,052	0,083	0,003	0,095	0,163	0,005	0,236
2,40	0,055	0,002	0,075	0,103	0,004	0,132	0,190	0,005	0,271
2,45	0,091	0,003	0,096	0,159	0,005	0,168	0,247	0,007	0,330
2,50	0,149	0,004	0,126	0,257	0,006	0,219	0,465	0,012	0,540
2,55	0,164	0,003	0,114	0,304	0,006	0,200	0,467	0,009	0,391
2,60	0,153	0,003	0,116	0,287	0,005	0,207	0,452	0,008	0,431
2,65	0,127	0,002	0,082	0,238	0,003	0,154	0,375	0,006	0,333
2,70	0,147	0,002	0,086	0,257	0,003	0,151	0,353	0,005	0,271
2,75	0,120	0,001	0,074	0,211	0,002	0,132	0,297	0,004	0,272
2,80	0,065	0,001	0,050	0,118	0,002	0,096	0,205	0,005	0,223

Tabela A.32 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC1

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,021	0,011	0,012	0,037	0,021	0,020	0,064	0,042	0,044
2,15	0,032	0,014	0,020	0,058	0,028	0,035	0,089	0,054	0,058
2,20	0,028	0,016	0,018	0,052	0,032	0,031	0,085	0,059	0,051
2,25	0,020	0,020	0,012	0,038	0,039	0,021	0,071	0,071	0,048
2,30	0,017	0,026	0,009	0,032	0,049	0,018	0,054	0,081	0,053
2,35	0,016	0,036	0,009	0,032	0,067	0,020	0,061	0,096	0,059
2,40	0,019	0,047	0,014	0,038	0,087	0,026	0,077	0,129	0,062
2,45	0,033	0,051	0,023	0,059	0,094	0,040	0,093	0,144	0,077
2,50	0,026	0,012	0,016	0,046	0,024	0,027	0,095	0,072	0,066
2,55	0,057	0,050	0,034	0,098	0,095	0,060	0,130	0,154	0,106
2,60	0,076	0,054	0,043	0,132	0,099	0,076	0,170	0,154	0,135
2,65	0,073	0,056	0,040	0,130	0,102	0,073	0,178	0,147	0,135
2,70	0,071	0,074	0,039	0,125	0,132	0,068	0,162	0,174	0,123
2,75	0,048	0,081	0,026	0,085	0,146	0,046	0,119	0,210	0,086
2,80	0,024	0,075	0,013	0,045	0,134	0,023	0,072	0,191	0,051

Tabela A.33 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC1

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,091	0,011	0,095	0,162	0,021	0,170	0,256	0,035	0,357
2,15	0,118	0,014	0,123	0,208	0,026	0,216	0,331	0,043	0,456
2,20	0,139	0,015	0,145	0,246	0,029	0,254	0,371	0,049	0,511
2,25	0,167	0,018	0,176	0,293	0,033	0,305	0,439	0,055	0,594
2,30	0,206	0,021	0,216	0,355	0,040	0,371	0,495	0,066	0,681
2,35	0,263	0,028	0,274	0,452	0,053	0,470	0,594	0,082	0,825
2,40	0,301	0,038	0,310	0,519	0,070	0,535	0,703	0,106	0,958
2,45	0,278	0,044	0,279	0,476	0,081	0,478	0,600	0,129	0,793
2,50	0,103	0,012	0,108	0,182	0,023	0,190	0,430	0,072	0,610
2,55	0,243	0,047	0,233	0,417	0,089	0,399	0,546	0,144	0,700
2,60	0,213	0,054	0,195	0,368	0,098	0,337	0,495	0,151	0,604
2,65	0,146	0,058	0,131	0,263	0,104	0,235	0,395	0,149	0,475
2,70	0,109	0,077	0,098	0,197	0,137	0,178	0,284	0,180	0,374
2,75	0,072	0,085	0,069	0,133	0,153	0,129	0,210	0,217	0,285
2,80	0,072	0,079	0,075	0,144	0,142	0,150	0,293	0,200	0,418

Tabela A.34 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC1

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,009	0,015	0,009	0,017	0,029	0,018	0,024	0,048	0,041
2,15	0,012	0,018	0,010	0,021	0,034	0,021	0,029	0,060	0,048
2,20	0,012	0,020	0,011	0,020	0,038	0,021	0,029	0,067	0,045
2,25	0,011	0,022	0,012	0,020	0,042	0,023	0,030	0,072	0,050
2,30	0,011	0,025	0,014	0,020	0,047	0,026	0,033	0,078	0,050
2,35	0,013	0,029	0,015	0,023	0,054	0,028	0,038	0,089	0,055
2,40	0,016	0,033	0,014	0,029	0,062	0,026	0,045	0,101	0,059
2,45	0,019	0,037	0,015	0,035	0,069	0,028	0,054	0,114	0,068
2,50	0,011	0,017	0,010	0,019	0,031	0,019	0,046	0,080	0,069
2,55	0,023	0,042	0,024	0,042	0,078	0,044	0,066	0,130	0,081
2,60	0,027	0,050	0,033	0,051	0,091	0,062	0,076	0,139	0,124
2,65	0,027	0,057	0,034	0,053	0,101	0,065	0,080	0,145	0,141
2,70	0,035	0,078	0,036	0,064	0,138	0,068	0,093	0,188	0,140
2,75	0,037	0,087	0,028	0,067	0,158	0,053	0,098	0,228	0,112
2,80	0,033	0,084	0,018	0,060	0,151	0,032	0,085	0,211	0,060

Tabela A.35 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC1

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,031	0,010	0,021	0,055	0,019	0,037	0,089	0,033	0,075
2,15	0,040	0,012	0,027	0,071	0,024	0,050	0,108	0,042	0,096
2,20	0,046	0,014	0,031	0,085	0,027	0,059	0,131	0,048	0,119
2,25	0,047	0,016	0,031	0,091	0,031	0,060	0,140	0,054	0,122
2,30	0,048	0,019	0,031	0,093	0,038	0,059	0,142	0,066	0,120
2,35	0,049	0,027	0,032	0,094	0,051	0,060	0,149	0,083	0,125
2,40	0,049	0,038	0,031	0,093	0,071	0,059	0,152	0,109	0,126
2,45	0,051	0,046	0,031	0,096	0,086	0,059	0,162	0,134	0,130
2,50	0,034	0,011	0,023	0,059	0,021	0,041	0,161	0,070	0,144
2,55	0,060	0,050	0,035	0,109	0,096	0,064	0,174	0,152	0,136
2,60	0,071	0,055	0,040	0,127	0,103	0,073	0,184	0,159	0,141
2,65	0,071	0,056	0,039	0,129	0,103	0,072	0,199	0,153	0,151
2,70	0,076	0,074	0,042	0,134	0,132	0,074	0,191	0,173	0,146
2,75	0,054	0,080	0,030	0,096	0,145	0,053	0,130	0,210	0,100
2,80	0,032	0,075	0,018	0,057	0,134	0,034	0,091	0,188	0,080

Tabela A.36 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC2

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,047	0,004	0,037	0,085	0,008	0,068	0,139	0,017	0,144
2,15	0,070	0,005	0,054	0,123	0,010	0,096	0,270	0,024	0,233
2,20	0,117	0,006	0,090	0,203	0,012	0,156	0,276	0,021	0,285
2,25	0,172	0,007	0,129	0,304	0,014	0,229	0,432	0,023	0,427
2,30	0,141	0,010	0,100	0,244	0,019	0,175	0,325	0,029	0,322
2,35	0,086	0,013	0,055	0,154	0,023	0,103	0,257	0,035	0,234
2,40	0,081	0,015	0,051	0,148	0,027	0,097	0,257	0,040	0,218
2,45	0,093	0,017	0,066	0,168	0,032	0,119	0,261	0,046	0,221
2,50	0,113	0,018	0,077	0,205	0,034	0,138	0,301	0,050	0,261
2,55	0,112	0,018	0,067	0,208	0,034	0,121	0,314	0,050	0,256
2,60	0,094	0,016	0,049	0,177	0,029	0,090	0,285	0,043	0,211
2,65	0,087	0,011	0,046	0,158	0,020	0,084	0,259	0,032	0,207
2,70	0,092	0,008	0,048	0,162	0,014	0,087	0,224	0,021	0,165
2,75	0,069	0,004	0,039	0,120	0,008	0,069	0,191	0,016	0,149
2,80	0,039	0,004	0,026	0,072	0,009	0,052	0,162	0,018	0,160

Tabela A.37 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC2

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,099	0,002	0,110	0,170	0,003	0,188	0,253	0,005	0,369
2,15	0,114	0,002	0,124	0,194	0,004	0,210	0,423	0,008	0,635
2,20	0,134	0,003	0,143	0,234	0,006	0,246	0,342	0,008	0,461
2,25	0,162	0,004	0,170	0,298	0,007	0,302	0,432	0,011	0,557
2,30	0,183	0,003	0,194	0,337	0,006	0,347	0,472	0,008	0,651
2,35	0,212	0,003	0,227	0,376	0,005	0,394	0,552	0,008	0,741
2,40	0,264	0,004	0,280	0,458	0,007	0,479	0,612	0,009	0,826
2,45	0,303	0,006	0,317	0,522	0,010	0,542	0,708	0,013	0,927
2,50	0,283	0,006	0,288	0,483	0,011	0,491	0,601	0,017	0,795
2,55	0,240	0,007	0,236	0,410	0,012	0,403	0,518	0,017	0,718
2,60	0,195	0,006	0,185	0,336	0,010	0,323	0,457	0,014	0,607
2,65	0,130	0,004	0,122	0,235	0,006	0,224	0,356	0,010	0,466
2,70	0,094	0,003	0,094	0,173	0,005	0,177	0,274	0,008	0,399
2,75	0,063	0,002	0,074	0,119	0,003	0,138	0,209	0,006	0,302
2,80	0,074	0,002	0,084	0,156	0,003	0,169	0,355	0,006	0,490

Tabela A.38 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC2

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,007	0,001	0,011	0,013	0,003	0,021	0,023	0,004	0,043
2,15	0,009	0,002	0,012	0,017	0,003	0,022	0,037	0,006	0,077
2,20	0,012	0,003	0,014	0,023	0,005	0,026	0,038	0,007	0,064
2,25	0,016	0,004	0,021	0,029	0,007	0,040	0,050	0,009	0,089
2,30	0,015	0,003	0,025	0,026	0,005	0,048	0,041	0,007	0,106
2,35	0,014	0,002	0,024	0,025	0,003	0,043	0,036	0,006	0,087
2,40	0,015	0,001	0,025	0,028	0,003	0,046	0,039	0,004	0,094
2,45	0,017	0,001	0,029	0,031	0,002	0,056	0,045	0,004	0,115
2,50	0,018	0,001	0,033	0,033	0,002	0,063	0,051	0,004	0,142
2,55	0,019	0,001	0,039	0,035	0,002	0,073	0,054	0,004	0,156
2,60	0,021	0,001	0,045	0,037	0,002	0,081	0,051	0,004	0,162
2,65	0,018	0,001	0,043	0,033	0,002	0,078	0,050	0,004	0,163
2,70	0,018	0,001	0,045	0,031	0,002	0,080	0,044	0,003	0,148
2,75	0,012	0,001	0,032	0,021	0,002	0,055	0,030	0,003	0,100
2,80	0,006	0,001	0,016	0,012	0,002	0,029	0,022	0,004	0,056

Tabela A.39 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC2

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,035	0,001	0,016	0,064	0,002	0,031	0,118	0,004	0,081
2,15	0,038	0,002	0,018	0,069	0,003	0,035	0,210	0,005	0,178
2,20	0,045	0,002	0,023	0,083	0,004	0,044	0,141	0,006	0,108
2,25	0,052	0,003	0,024	0,099	0,006	0,047	0,173	0,008	0,134
2,30	0,080	0,003	0,050	0,148	0,005	0,090	0,248	0,008	0,188
2,35	0,088	0,003	0,061	0,167	0,005	0,110	0,276	0,007	0,225
2,40	0,086	0,002	0,063	0,168	0,005	0,113	0,274	0,007	0,229
2,45	0,095	0,002	0,064	0,185	0,004	0,117	0,306	0,007	0,239
2,50	0,112	0,002	0,073	0,214	0,004	0,134	0,329	0,007	0,257
2,55	0,119	0,002	0,077	0,223	0,004	0,142	0,324	0,006	0,273
2,60	0,121	0,001	0,069	0,217	0,003	0,127	0,319	0,005	0,257
2,65	0,118	0,001	0,062	0,211	0,002	0,113	0,312	0,004	0,233
2,70	0,130	0,001	0,067	0,232	0,002	0,120	0,321	0,003	0,225
2,75	0,095	0,001	0,049	0,170	0,002	0,088	0,240	0,003	0,166
2,80	0,049	0,001	0,026	0,088	0,002	0,048	0,144	0,004	0,110

Tabela A.40 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC3

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,026	0,015	0,014	0,046	0,028	0,025	0,073	0,051	0,051
2,15	0,029	0,017	0,016	0,050	0,031	0,027	0,122	0,088	0,081
2,20	0,036	0,020	0,020	0,065	0,036	0,037	0,095	0,065	0,068
2,25	0,040	0,023	0,022	0,076	0,043	0,042	0,117	0,074	0,087
2,30	0,041	0,027	0,021	0,079	0,051	0,042	0,128	0,088	0,090
2,35	0,041	0,033	0,021	0,080	0,062	0,041	0,126	0,100	0,087
2,40	0,041	0,043	0,021	0,080	0,080	0,040	0,124	0,123	0,090
2,45	0,037	0,052	0,019	0,070	0,097	0,037	0,124	0,149	0,092
2,50	0,032	0,054	0,019	0,065	0,100	0,038	0,139	0,175	0,108
2,55	0,076	0,064	0,043	0,131	0,122	0,076	0,214	0,192	0,162
2,60	0,068	0,060	0,039	0,117	0,108	0,071	0,155	0,164	0,137
2,65	0,072	0,066	0,041	0,127	0,117	0,075	0,175	0,165	0,160
2,70	0,074	0,088	0,042	0,130	0,156	0,076	0,168	0,205	0,154
2,75	0,051	0,097	0,029	0,090	0,175	0,054	0,132	0,248	0,109
2,80	0,029	0,090	0,015	0,053	0,162	0,028	0,079	0,230	0,060

Tabela A.41 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC3

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,052	0,014	0,061	0,098	0,027	0,113	0,168	0,041	0,246
2,15	0,060	0,015	0,069	0,111	0,028	0,126	0,261	0,088	0,399
2,20	0,071	0,017	0,081	0,131	0,031	0,146	0,214	0,056	0,307
2,25	0,085	0,019	0,095	0,149	0,035	0,166	0,234	0,064	0,336
2,30	0,104	0,022	0,117	0,178	0,041	0,200	0,266	0,070	0,385
2,35	0,133	0,026	0,147	0,226	0,048	0,251	0,308	0,079	0,439
2,40	0,178	0,033	0,193	0,303	0,062	0,330	0,373	0,091	0,558
2,45	0,210	0,042	0,223	0,363	0,078	0,385	0,482	0,113	0,678
2,50	0,197	0,047	0,202	0,340	0,088	0,346	0,558	0,157	0,760
2,55	0,278	0,059	0,267	0,476	0,112	0,455	0,623	0,180	0,784
2,60	0,155	0,061	0,140	0,270	0,109	0,241	0,360	0,163	0,423
2,65	0,109	0,068	0,094	0,196	0,121	0,168	0,294	0,167	0,336
2,70	0,084	0,092	0,071	0,151	0,163	0,127	0,210	0,212	0,257
2,75	0,054	0,102	0,048	0,098	0,183	0,089	0,148	0,264	0,193
2,80	0,049	0,095	0,049	0,095	0,171	0,097	0,168	0,239	0,244

Tabela A.42 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC3

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,008	0,019	0,017	0,015	0,036	0,031	0,025	0,054	0,062
2,15	0,008	0,020	0,018	0,015	0,036	0,034	0,045	0,092	0,121
2,20	0,009	0,020	0,020	0,016	0,036	0,038	0,026	0,058	0,080
2,25	0,009	0,021	0,023	0,017	0,038	0,044	0,027	0,064	0,094
2,30	0,009	0,022	0,025	0,018	0,041	0,048	0,030	0,070	0,101
2,35	0,010	0,024	0,026	0,020	0,045	0,051	0,033	0,076	0,104
2,40	0,013	0,028	0,028	0,024	0,052	0,053	0,040	0,089	0,111
2,45	0,016	0,033	0,026	0,030	0,062	0,049	0,048	0,100	0,100
2,50	0,020	0,040	0,022	0,036	0,073	0,043	0,074	0,126	0,129
2,55	0,026	0,054	0,035	0,049	0,100	0,066	0,074	0,161	0,152
2,60	0,030	0,062	0,035	0,055	0,109	0,065	0,079	0,159	0,131
2,65	0,032	0,070	0,037	0,060	0,125	0,071	0,093	0,175	0,157
2,70	0,041	0,094	0,040	0,076	0,168	0,077	0,112	0,226	0,165
2,75	0,043	0,104	0,032	0,079	0,189	0,062	0,123	0,275	0,133
2,80	0,039	0,099	0,022	0,069	0,177	0,039	0,096	0,242	0,074

Tabela A.43 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC3

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,041	0,014	0,034	0,069	0,026	0,058	0,090	0,041	0,101
2,15	0,037	0,015	0,029	0,063	0,028	0,050	0,121	0,090	0,128
2,20	0,049	0,017	0,037	0,084	0,030	0,064	0,106	0,055	0,111
2,25	0,052	0,019	0,040	0,091	0,035	0,070	0,121	0,062	0,130
2,30	0,039	0,022	0,031	0,066	0,041	0,053	0,098	0,068	0,102
2,35	0,029	0,026	0,023	0,052	0,049	0,040	0,089	0,078	0,085
2,40	0,026	0,034	0,019	0,048	0,063	0,034	0,094	0,093	0,077
2,45	0,024	0,043	0,017	0,047	0,081	0,031	0,094	0,121	0,074
2,50	0,024	0,048	0,016	0,049	0,090	0,029	0,100	0,159	0,107
2,55	0,052	0,062	0,022	0,096	0,117	0,044	0,157	0,185	0,107
2,60	0,045	0,058	0,020	0,080	0,105	0,038	0,119	0,161	0,083
2,65	0,055	0,064	0,027	0,098	0,114	0,047	0,139	0,161	0,094
2,70	0,071	0,087	0,036	0,123	0,154	0,062	0,157	0,201	0,105
2,75	0,057	0,096	0,032	0,100	0,173	0,056	0,131	0,244	0,108
2,80	0,026	0,090	0,017	0,046	0,162	0,032	0,066	0,227	0,082

Tabela A.44 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC4

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,030	0,004	0,005	0,052	0,008	0,009	0,073	0,012	0,021
2,15	0,038	0,005	0,006	0,066	0,009	0,011	0,112	0,019	0,045
2,20	0,045	0,006	0,008	0,081	0,011	0,015	0,113	0,015	0,029
2,25	0,050	0,007	0,009	0,092	0,013	0,016	0,150	0,019	0,037
2,30	0,047	0,008	0,008	0,088	0,015	0,016	0,141	0,022	0,036
2,35	0,041	0,010	0,009	0,074	0,017	0,018	0,105	0,025	0,044
2,40	0,035	0,012	0,014	0,065	0,021	0,025	0,103	0,028	0,054
2,45	0,038	0,014	0,022	0,070	0,024	0,038	0,111	0,032	0,063
2,50	0,045	0,014	0,028	0,079	0,024	0,048	0,120	0,030	0,079
2,55	0,073	0,018	0,045	0,134	0,032	0,082	0,213	0,045	0,159
2,60	0,061	0,011	0,036	0,105	0,020	0,062	0,138	0,027	0,107
2,65	0,057	0,008	0,032	0,100	0,014	0,057	0,136	0,021	0,106
2,70	0,057	0,005	0,032	0,100	0,010	0,055	0,133	0,015	0,096
2,75	0,038	0,003	0,020	0,066	0,006	0,036	0,095	0,011	0,063
2,80	0,019	0,004	0,009	0,034	0,008	0,016	0,069	0,017	0,034

Tabela A.45 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC4

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,064	0,002	0,068	0,110	0,003	0,123	0,182	0,005	0,266
2,15	0,075	0,002	0,078	0,131	0,003	0,140	0,265	0,009	0,446
2,20	0,091	0,002	0,090	0,163	0,004	0,159	0,234	0,006	0,334
2,25	0,108	0,003	0,106	0,198	0,005	0,184	0,306	0,007	0,370
2,30	0,132	0,003	0,129	0,237	0,005	0,222	0,338	0,008	0,430
2,35	0,163	0,004	0,161	0,288	0,006	0,275	0,384	0,009	0,492
2,40	0,206	0,004	0,207	0,361	0,008	0,354	0,487	0,010	0,604
2,45	0,240	0,005	0,242	0,419	0,009	0,417	0,562	0,012	0,737
2,50	0,238	0,005	0,236	0,407	0,009	0,401	0,516	0,011	0,649
2,55	0,279	0,006	0,269	0,495	0,011	0,473	0,710	0,015	0,870
2,60	0,165	0,004	0,152	0,288	0,007	0,261	0,389	0,009	0,461
2,65	0,110	0,002	0,098	0,197	0,004	0,175	0,306	0,006	0,347
2,70	0,081	0,002	0,073	0,148	0,003	0,132	0,240	0,005	0,285
2,75	0,053	0,001	0,051	0,101	0,003	0,095	0,180	0,004	0,218
2,80	0,058	0,001	0,056	0,113	0,003	0,111	0,207	0,006	0,295

Tabela A.46 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC4

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,018	0,000	0,009	0,032	0,001	0,016	0,042	0,001	0,031
2,15	0,024	0,000	0,011	0,042	0,001	0,018	0,054	0,001	0,052
2,20	0,030	0,001	0,012	0,053	0,001	0,022	0,072	0,001	0,044
2,25	0,033	0,001	0,013	0,061	0,001	0,025	0,095	0,002	0,057
2,30	0,033	0,001	0,012	0,060	0,001	0,023	0,098	0,002	0,051
2,35	0,029	0,000	0,010	0,053	0,001	0,019	0,072	0,001	0,040
2,40	0,025	0,000	0,010	0,046	0,001	0,019	0,064	0,002	0,040
2,45	0,022	0,001	0,013	0,042	0,001	0,023	0,062	0,002	0,046
2,50	0,020	0,001	0,017	0,039	0,001	0,029	0,061	0,002	0,055
2,55	0,024	0,001	0,030	0,046	0,001	0,055	0,079	0,002	0,109
2,60	0,018	0,001	0,026	0,033	0,001	0,044	0,052	0,001	0,075
2,65	0,014	0,000	0,024	0,026	0,001	0,043	0,045	0,001	0,077
2,70	0,013	0,000	0,025	0,024	0,001	0,043	0,036	0,001	0,074
2,75	0,009	0,000	0,017	0,017	0,001	0,029	0,026	0,001	0,053
2,80	0,009	0,000	0,007	0,017	0,000	0,013	0,032	0,001	0,031

Tabela A.47 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC4

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,033	0,000	0,011	0,063	0,000	0,020	0,097	0,001	0,046
2,15	0,043	0,000	0,014	0,081	0,001	0,026	0,155	0,001	0,069
2,20	0,053	0,001	0,020	0,099	0,001	0,035	0,170	0,001	0,072
2,25	0,055	0,001	0,019	0,099	0,001	0,034	0,161	0,001	0,066
2,30	0,050	0,000	0,014	0,087	0,001	0,024	0,133	0,001	0,048
2,35	0,043	0,000	0,010	0,077	0,001	0,020	0,119	0,001	0,047
2,40	0,036	0,000	0,010	0,066	0,001	0,019	0,100	0,001	0,050
2,45	0,032	0,000	0,011	0,060	0,001	0,021	0,095	0,001	0,054
2,50	0,034	0,000	0,015	0,066	0,001	0,029	0,114	0,001	0,069
2,55	0,059	0,000	0,029	0,114	0,001	0,054	0,195	0,001	0,112
2,60	0,055	0,000	0,027	0,097	0,000	0,046	0,142	0,001	0,081
2,65	0,059	0,000	0,030	0,104	0,000	0,052	0,148	0,001	0,092
2,70	0,068	0,000	0,034	0,119	0,001	0,061	0,156	0,001	0,102
2,75	0,050	0,000	0,026	0,088	0,000	0,046	0,120	0,001	0,079
2,80	0,023	0,000	0,011	0,041	0,000	0,020	0,078	0,001	0,038

Tabela A.48 – Acelerações no primeiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC5

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,041	0,006	0,022	0,071	0,011	0,038	0,122	0,017	0,087
2,15	0,045	0,008	0,025	0,079	0,014	0,043	0,209	0,026	0,150
2,20	0,056	0,011	0,031	0,101	0,020	0,056	0,148	0,028	0,107
2,25	0,063	0,012	0,034	0,119	0,022	0,065	0,182	0,032	0,134
2,30	0,062	0,011	0,032	0,120	0,021	0,063	0,190	0,032	0,136
2,35	0,061	0,011	0,031	0,119	0,021	0,061	0,206	0,033	0,148
2,40	0,062	0,013	0,032	0,122	0,022	0,063	0,215	0,032	0,156
2,45	0,072	0,014	0,039	0,136	0,024	0,073	0,236	0,033	0,170
2,50	0,089	0,013	0,051	0,162	0,022	0,091	0,353	0,036	0,260
2,55	0,170	0,019	0,096	0,293	0,032	0,166	0,435	0,043	0,320
2,60	0,121	0,010	0,068	0,215	0,019	0,120	0,313	0,028	0,232
2,65	0,118	0,008	0,065	0,213	0,015	0,117	0,322	0,024	0,236
2,70	0,127	0,006	0,069	0,224	0,012	0,122	0,314	0,018	0,228
2,75	0,090	0,005	0,049	0,159	0,009	0,086	0,217	0,013	0,155
2,80	0,047	0,005	0,025	0,085	0,010	0,046	0,118	0,024	0,085

Tabela A.49 – Acelerações no segundo ponto de análise com o emprego do AMS – MC5

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,047	0,002	0,060	0,090	0,004	0,113	0,157	0,006	0,249
2,15	0,058	0,002	0,071	0,111	0,004	0,132	0,245	0,010	0,415
2,20	0,073	0,003	0,084	0,137	0,005	0,156	0,206	0,007	0,311
2,25	0,084	0,003	0,096	0,151	0,006	0,172	0,222	0,009	0,337
2,30	0,098	0,004	0,115	0,170	0,007	0,198	0,260	0,010	0,380
2,35	0,125	0,004	0,144	0,214	0,007	0,245	0,301	0,011	0,427
2,40	0,170	0,005	0,189	0,290	0,009	0,322	0,353	0,012	0,532
2,45	0,210	0,005	0,223	0,362	0,009	0,385	0,466	0,013	0,672
2,50	0,208	0,005	0,211	0,357	0,009	0,362	0,565	0,016	0,797
2,55	0,300	0,007	0,284	0,513	0,013	0,484	0,635	0,015	0,804
2,60	0,159	0,004	0,142	0,273	0,007	0,243	0,338	0,009	0,417
2,65	0,110	0,003	0,091	0,192	0,004	0,161	0,259	0,006	0,312
2,70	0,082	0,002	0,068	0,139	0,004	0,121	0,184	0,006	0,252
2,75	0,044	0,002	0,046	0,078	0,003	0,086	0,125	0,005	0,194
2,80	0,042	0,002	0,049	0,085	0,003	0,097	0,153	0,007	0,241

Tabela A.50 – Acelerações no terceiro ponto de análise com o emprego do AMS – MC5

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,004	0,001	0,018	0,008	0,002	0,032	0,013	0,003	0,071
2,15	0,005	0,001	0,020	0,010	0,002	0,035	0,026	0,004	0,125
2,20	0,007	0,002	0,024	0,013	0,003	0,044	0,021	0,005	0,086
2,25	0,007	0,002	0,027	0,013	0,004	0,052	0,021	0,005	0,106
2,30	0,006	0,002	0,027	0,010	0,003	0,052	0,019	0,005	0,111
2,35	0,006	0,001	0,027	0,010	0,003	0,052	0,021	0,004	0,120
2,40	0,008	0,001	0,027	0,014	0,003	0,053	0,023	0,004	0,125
2,45	0,011	0,001	0,031	0,019	0,003	0,059	0,027	0,004	0,137
2,50	0,014	0,001	0,038	0,025	0,003	0,069	0,045	0,007	0,202
2,55	0,028	0,002	0,073	0,049	0,004	0,126	0,066	0,006	0,250
2,60	0,020	0,001	0,052	0,035	0,003	0,092	0,045	0,004	0,179
2,65	0,019	0,001	0,051	0,034	0,002	0,092	0,045	0,004	0,185
2,70	0,020	0,001	0,055	0,036	0,002	0,098	0,044	0,003	0,183
2,75	0,014	0,001	0,039	0,025	0,002	0,070	0,032	0,002	0,127
2,80	0,006	0,001	0,021	0,011	0,001	0,037	0,018	0,003	0,069

Tabela A.51 – Acelerações no quarto ponto de análise com o emprego do AMS – MC5

Freq. (Hz)	Aceleração RMS (m/s ²)			Aceleração em VDV (m/s ^{1,75})			Aceleração de Pico (m/s ²)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2,10	0,053	0,001	0,034	0,092	0,002	0,058	0,156	0,003	0,116
2,15	0,071	0,002	0,048	0,124	0,003	0,082	0,221	0,005	0,167
2,20	0,099	0,002	0,070	0,174	0,004	0,120	0,241	0,006	0,201
2,25	0,097	0,002	0,069	0,170	0,004	0,119	0,249	0,006	0,204
2,30	0,068	0,002	0,047	0,123	0,003	0,081	0,201	0,005	0,157
2,35	0,055	0,001	0,034	0,101	0,002	0,060	0,173	0,004	0,138
2,40	0,052	0,001	0,028	0,097	0,002	0,054	0,184	0,003	0,143
2,45	0,056	0,001	0,028	0,102	0,002	0,054	0,195	0,003	0,144
2,50	0,065	0,001	0,031	0,116	0,002	0,058	0,235	0,005	0,163
2,55	0,138	0,001	0,064	0,241	0,002	0,113	0,362	0,003	0,240
2,60	0,107	0,001	0,051	0,183	0,001	0,089	0,250	0,003	0,176
2,65	0,119	0,001	0,059	0,209	0,001	0,104	0,282	0,002	0,188
2,70	0,145	0,001	0,074	0,253	0,001	0,129	0,324	0,002	0,218
2,75	0,112	0,001	0,059	0,197	0,001	0,103	0,263	0,002	0,179
2,80	0,050	0,001	0,027	0,088	0,001	0,047	0,125	0,003	0,092

A3 – VERIFICAÇÃO DA PEÇA PRÉ-MOLDADA DA ARQUIBANCADA

Todas as bancadas da parte superior da estrutura é pré-moldada, conforme mostra a figura A.13. Uma vez que não sabe qual tratamento foi dado na junção das peças às vigas jacaré do estádio, bem quanto à continuidade ou não dos elementos da bancada, opta-se por considerar os elementos apenas bi apoiados, na verificação da fissuração, flecha e dos esforços solicitantes para a instalação dos AMS.

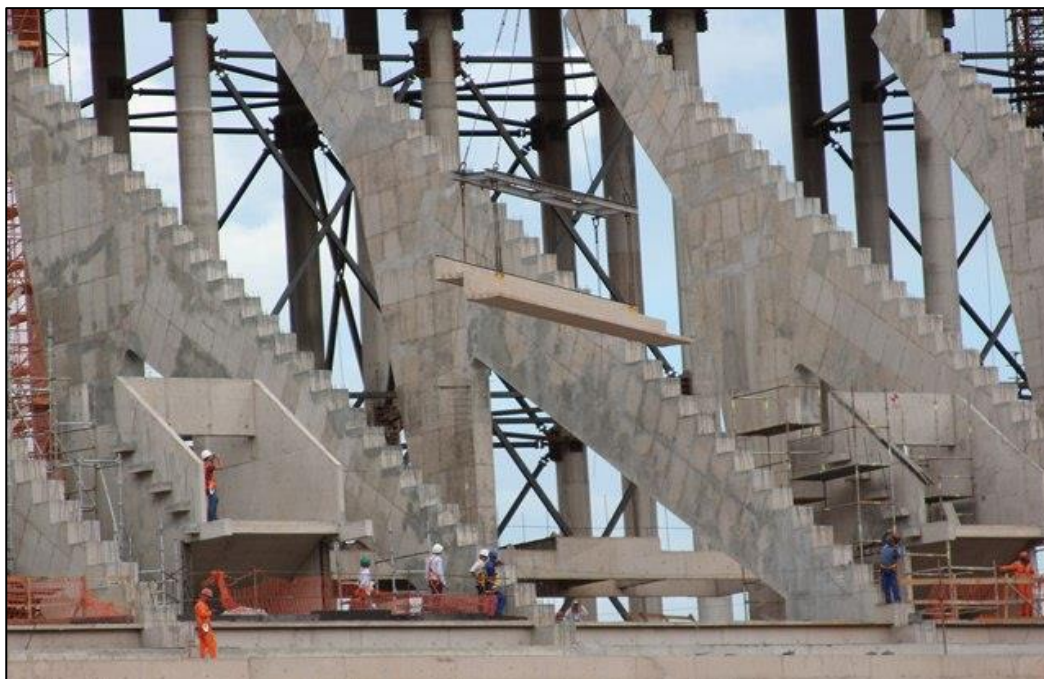


Figura A.13 – Construção das arquibancadas do Estádio Nacional

http://imguol.com/2012/05/07/inicio-das-obras-da-arquibancada-superior-do-estadio-mane-garrincha-1336425117165_956x500.jpg acesso em 11 de abril de 2016

.A seção transversal do elemento pré-moldado da bancada e as propriedades mecânicas da peça são apresentadas na figura A.14 e tabela A.52:

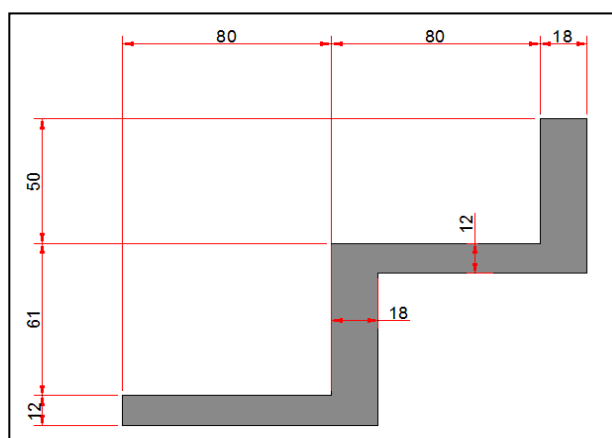


Figura A.14 – Seção transversal da bancada – medidas em cm

Tabela A.52 – Propriedades da bancada

A (m ²)	I (m ⁴)	Z (m ³)	E_{cs} (kN/m ²)	f_{ck} (kN/m ²)	P_p (kN/m)	S_c (kN/m)	P (kN)
0,413	0,052	0,105	30000000	30000	10,139	5,530	10,114

Onde,

A é a área da seção transversal da bancada;

I é o momento de inércia da seção;

Z é o momento resistente da seção;

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto;

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto;

P_p é o peso por metro da seção da bancada;

S_c é o peso por metro devido à sobrecarga, já levando em conta o coeficiente de impacto;

P é o peso por do AMS.

Os esforços solicitantes devido a cada um dos carregamentos são apresentados na tabela A.53

Tabela A.53 – Propriedades da bancada

V_{pp} (kN)	V_{sc} (kN)	V_p (kN)	M_{pp} (kNm)	V_{sc} (kNm)	M_p (kNm)
53,230	29,033	5,057	139,728	76,210	26,549

Onde,

V_{pp} é o esforço cortante devido ao peso próprio;

V_{sc} é o esforço cortante devido à sobrecarga;

V_p é o esforço cortante devido ao peso do AMS;

M_{pp} é o momento fletor devido ao peso próprio;

M_{sc} é o momento fletor devido à sobrecarga;

M_p é o momento fletor devido ao AMS;

A verificação quanto à fissuração é feita pela através da comparação do momento fletor atuante e do momento de fissuração da bancada (M_r), que é calculado através da equação A1. Caso o momento resistente seja superior ao atuante, a peça não fissura.

$$M_r = 1,2f_{ct}Z \quad \text{A.1}$$

Onde,

f_{ct} é a resistência à tração direta do concreto;

A resistência à tração do concreto é dada pela seguinte equação:

$$f_{ct} = 210f_{ck}^{2/3} \quad \text{A.2}$$

Assim, $f_{ct} = 2027,528 \text{ kN/m}^2$

O momento de fissuração é: $M_r = 255,469 \text{ kNm}$

O momento total é dado pela soma dos momentos atuantes, igual a 242,487 kNm, valor inferior ao momento resistente, ou seja, a bancada não sofre fissuração.

flecha inicial (f_0) devido à carga distribuída (P_p e S_c) pode ser calculada da seguinte forma:

$$f_0 = \frac{5qL^4}{384IEcs} \quad \text{A.3}$$

Onde:

L é o vão da viga em metros;

q é a carga distribuída;

I é o momento de inércia e

Ecs é o módulo de elasticidade secante do material.

A flecha devido à carga concentrada (P) é calculada da seguinte forma:

$$f_0 = \frac{PL^3}{48IEcs} \quad \text{A.4}$$

A tabela A.54 apresenta os resultados das flechas iniciais devido a cada carregamento:

Tabela A.54 – Flechas iniciais da bancada

f_{0Pp} (mm)	f_{0Sc} (mm)	f_{0P} (mm)
1,021	0,557	0,155

A flecha admissível em mm (f_{adm}) é dada pela seguinte equação:

$$f_{adm} = \frac{L}{2,5} \quad \text{A.5}$$

O vão em questão possui 10,50 metros, de forma que pode ser admitida uma flecha de até 42 mm na estrutura.

Para a consideração da deformação lenta devido à fluência do concreto, adota-se a equação apresentada na NBR 6118 (2014), reproduzida abaixo:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1+50\rho'} \quad \text{A.6}$$

Onde:

α_f é a quantidade que a flecha aumenta durante a vida útil da estrutura

ρ' é a taxa de armadura de compressão existente na viga, considerada nula nesse trabalho, visto que não se conhece o projeto de armação das arquibancadas.

$\Delta\xi$ é um coeficiente que varia com a idade da estrutura e é dado pela seguinte equação:

$$\Delta\xi = \xi_t - \xi_{t_0} \quad \text{A.7}$$

ξ_t é igual a 2 para valores superiores a 70 meses e ξ_{t_0} é dado pela seguinte equação:

$$\xi_{t_0} = 0,68(0,996^t)t^{0,32} \quad \text{A.8}$$

Onde t é a vida da estrutura em meses.

A flecha final devido ao peso próprio da bancada é calculada levando em conta que o elemento pré-moldado foi colocado com um mês de vida, assim:

$$\xi_{t_1} = 0,68(0,996^1)1^{0,32} = 0,677$$

$$\Delta\xi = 2 - 0,677 = 1,323$$

Dessa forma, a flecha final (f_{final}) devido ao peso próprio é:

$$f_{final} = (1 + 1,323)1,021 = 2,372 \text{ mm}$$

A flecha final devido à instalação dos dispositivos de atenuação e torcida é calculada levando em conta que a atuação passa a ocorrer após o mês de número 50. Lembra-se que a figura A13 apresenta a construção da obra em julho de 2012. Assim:

$$\xi_{t50} = 0,68(0,996^{50})50^{0,32} = 1,946$$

$$\Delta\xi = 2 - 1,946 = 0,054$$

Dessa forma, a flecha final (f_{final}) devido à torcida e a instalação dos AMS é:

$$f_{final} = (1 + 0,054)(0,557 + 0,155) = 0,750 \text{ mm}$$

A soma das duas parcelas apresenta a flecha diferida no tempo em função de todos os carregamentos, assim:

$$f_{final} = 2,372 + 0,750 = 3,122 \text{ mm} < 42 \text{ mm} \Rightarrow \text{ok.}$$

A verificação dos esforços solicitantes, momento fletor e esforço cortante, só pode ser realizada com o conhecimento da armadura adotada em cada bancada pré-moldada. No entanto, o projeto de armação não foi disponibilizado, não sendo possível a sua verificação.

De toda forma, o momento característico atuante é inferior ao momento de fissuração da viga, mesmo com a consideração do AMS instalado. Assim, entende-se que a bancada possui reserva mecânica suficiente para aguentar a flexão, sendo talvez, necessário realizar algum reforço com armadura complementar ou mesmo fibra de carbono para os esforços de tração.

Com relação aos esforços cortantes, independente da taxa de armadura transversal, deve ser verificada a condição:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad \text{A.9}$$

Onde:

V_{Sd} é o esforço cortante de cálculo da bancada;

V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína da biela, assim:

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2}f_{cd}b_wd \quad \text{A.10}$$

Onde:

f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto, igual a 21428,571 kN/m²

b_w é a largura da peça, igual a 0,18 m;

d é a altura útil da peça, igual a 1,18 m.

α_{v2} é dado por:

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad \text{A.11}$$

$$V_{Rd2} = 1081,419 \text{ kN}$$

$$V_{Sd} = 122,248 \text{ kN}$$

O valor do esforço cortante de cálculo se mostra bastante inferior ao esmagamento da biela, mostrando que a bancada possui boa reserva mecânica. Assim como no caso da verificação aos esforços de momento fletor, pode ser necessária a inserção de reforço devido aos esforços de tração, seja por armaduras complementares ou ainda de por fibra de carbono. No entanto, só é possível fazer essa verificação tendo vistas dos projetos de armação.