



Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia

Danielle Fernandes Campista

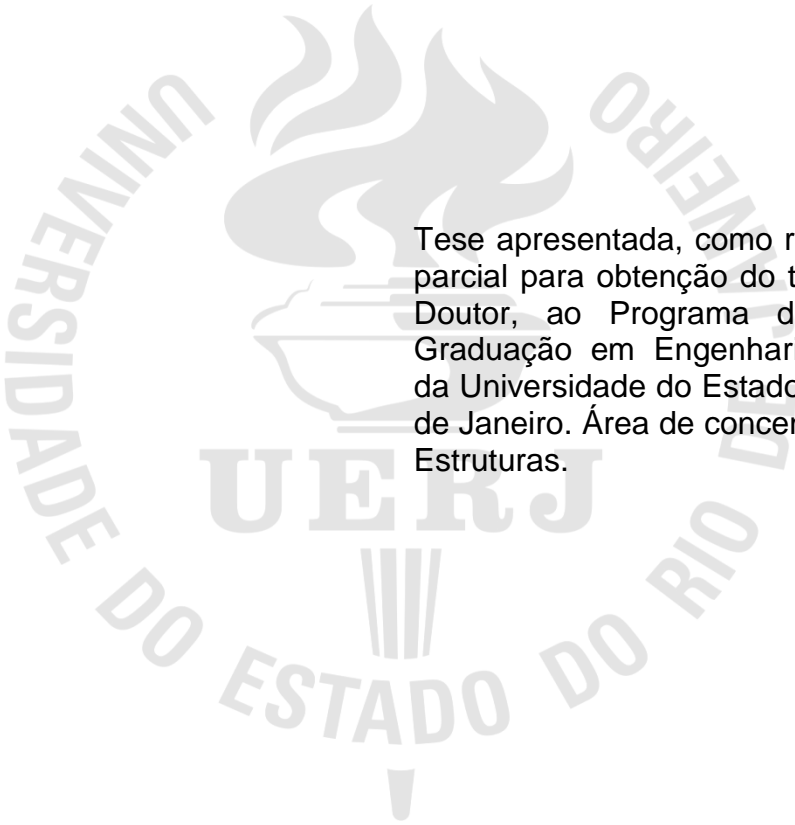
**Estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do  
conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de  
Brasília com base no emprego de sistemas biodinâmicos**

Rio de Janeiro

2019

Danielle Fernandes Campista

**Estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília com base no emprego de sistemas biodinâmicos**



Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C197 Campista, Danielle Fernandes.  
Estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília com base no emprego de sistemas biodinâmicos / Danielle Fernandes Campista. – 2019.  
273f.

Orientador: José Guilherme Santos da Silva.  
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 3. Conforto humano - Teses. 4. Estádios - Brasília (DF) - Teses. 5. Método dos elementos finitos - Teses. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.07

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

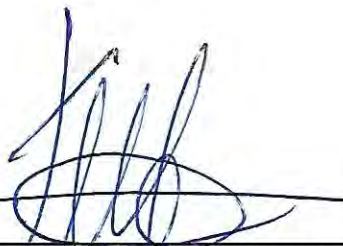
Danielle Fernandes Campista

**Estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação de conforto humano  
das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília com base no emprego de  
sistemas biodinâmicos**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 31 de maio de 2019.

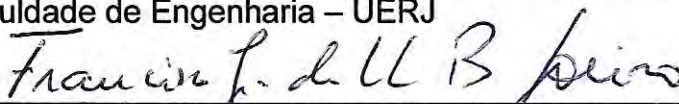
Banca Examinadora:



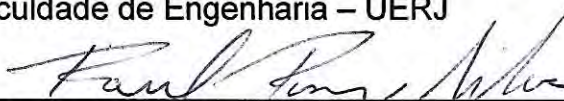
Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva – Presidente / Orientador  
Faculdade de Engenharia – UERJ



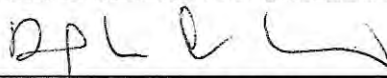
Profa. Dra. Maria Fernanda Figueiredo de Oliveira  
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro  
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Raul Rosas e Silva  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio



Prof. Dr. Daniel Carlos Taissum Cardoso  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Rio de Janeiro

2019

## DEDICATÓRIA

A Deus e minha família

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me dar força, coragem e sabedoria em todas as etapas da minha vida e por abençoar minha vida.

Aos meus pais Ronald e Rosalva, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos, pelo amor incondicional, me dando todo o apoio e força necessários para me fazer seguir sempre em frente.

Ao meu marido Bruno, pelo amor oferecido, companheirismo, incentivo, apoio, compreensão e motivação para alcançar meus objetivos.

A minha irmã Fernanda, que sempre me apoiou e sempre esteve disposta a me ajudar no que fosse preciso.

Aos meus amigos, que conquistei ao longo desta jornada, que sempre estiveram presentes para me ajudar nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Professor José Guilherme, que confiou em minha capacidade, pelo incentivo, motivação, orientação e amizade.

Você ganha força, coragem e confiança através de cada  
experiência em que você realmente para  
e encara o medo de frente.

*Eleanor Roosevelt*

## RESUMO

CAMPISTA, Danielle Fernandes. *Estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília com base no emprego de sistemas biodinâmicos*. 2019. 273f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

De modo geral, os estádios de futebol têm sido projetados para suportar as cargas acidentais (cargas das pessoas), como sendo associadas a carregamentos estáticos. Todavia, ao longo dos anos, com base na modificação do comportamento do público, especialmente em jogos de futebol, a partir da ação de torcidas organizadas; e, ainda, com o emprego de estádios de futebol para shows de música, estes sistemas estruturais passaram a sofrer um maior impacto em função da natureza da ação dos carregamentos dinâmicos oriundos das pessoas. Assim sendo, alguns destes estádios passaram a apresentar problemas de vibrações excessivas, e tornou-se necessária a consideração efetiva das cargas dinâmicas nos projetos estruturais. De acordo com este contexto, este trabalho de pesquisa tem como objetivo o estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do desempenho de arquibancadas de estádios de futebol, no que diz respeito à avaliação do conforto humano, com base no emprego de sistemas biodinâmicos representativos das pessoas. Para tal, esta investigação considera o desenvolvimento do estudo com base no projeto estrutural das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília. Deste modo, a modelagem numérica do sistema estrutural investigado foi realizada com base no emprego do programa computacional ANSYS, a partir da utilização de técnicas usuais de discretização, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). No que tange à modelagem das ações dinâmicas representativas das pessoas (torcidas), foram utilizados sistemas biodinâmicos acoplados ao sistema estrutural das arquibancadas. A investigação considera o efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura (torcidas-arquibancada), a partir do emprego de modelos biodinâmicos correspondentes a sistemas do tipo massa-mola-amortecedor, com um grau de liberdade (S1GL), de maneira a representar o comportamento dinâmico do corpo humano. As características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) foram determinadas mediante a realização de testes experimentais; e, também, com base na resolução matemática de um problema clássico de otimização, mediante a utilização de Algoritmos Genéticos (AG). Os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa evidenciam com clareza a relevância da investigação acerca da análise de vibrações de arquibancadas de estádios de futebol, considerando-se o efeito da interação dinâmica indivíduos estrutura, especialmente no que diz respeito a análises mais realistas, sob um ponto de vista quantitativo, acerca dos valores das acelerações de pico e posterior avaliação do conforto humano da estrutura.

Palavras-chave: Arquibancadas de estádios de futebol; Comportamento estrutural dinâmico; Sistemas biodinâmicos; Testes experimentais; Conforto humano; Modelagem em elementos finitos.



## ABSTRACT

CAMPISTA, Danielle Fernandes. *Study the dynamic behaviour and human comfort assessment of the Brasilia National Stadium grandstands based on modelling of the biodynamic systems*. 2019. 273f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Generally, soccer stadiums have been designed to stand accidental loads (people loads), associated with static loads. However, over the years, based on the changes in the people's behaviour, especially in soccer matches, from the organized crowd action; and also based on the use of soccer stadiums for music shows, these structural systems have been subjected to dynamic impacts due to the nature of the dynamic loads coming from people. Therefore, some of these stadiums have presented excessive vibration problems and have required an effective consideration of the dynamic loadings in the structural design. According to this context, this research work aims to study the dynamic behaviour and evaluate the structural system performance of the soccer stadiums grandstands, when the human comfort is considered, based on modelling of the biodynamic systems representative of people. This way, this investigation considers the development of the study, based on the Brasilia National Stadium grandstands. Thus, the numerical modeling of the investigated structural system was carried out based on the ANSYS computational program, using the discretization techniques present in the Finite Element Method (FEM). Regarding the modeling of dynamic actions representative of the people (soccer fans), the biodynamic systems were considered coupled to the structural system of the investigated grandstands. This investigation considers the effect of the dynamic interaction individuals-structure (soccer fans-grandstand), based on the use of biodynamic models corresponding to mass-spring-damping systems, with one degree of freedom (SDOF), in order to represent the behaviour of the human body. The dynamic characteristics of the biodynamic systems (mass, stiffness and damping) were determined based on experimental tests; and also based on the mathematical resolution of a classical optimization problem using Genetic Algorithms (GA). The obtained results of this research clearly show the relevance of the investigation related to the vibration analysis of soccer stadium grandstands, considering the dynamic interaction effect of individuals-structure, especially with respect to the more realistic and detailed quantitative analyses, on the peak accelerations values and subsequent human comfort assessment of the structure.

Keywords: Soccer stadium grandstands; Dynamic structural behaviour; Biodynamic models, Experimental tests; Human comfort; Finite element modelling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estádio localizado em Cracóvia (TATARA; PTASZNIK, 2015) .....	39
Figura 2 - Piso misto suportado por cabos sob atividades humanas (AN et al., 2016).....	40
Figura 3 - Vistas da arquibancada do estádio Eden, em Praga (PLACHY; POLAK; VERNER, 2017) .....	41
Figura 4 - Movimentos de um indivíduo durante um salto (FAISCA, 2003).....	42
Figura 5 - Força aplicada em uma estrutura durante um salto (FAISCA, 2003).....	43
Figura 6 - Saltos rítmicos [Adaptado de Meghdari e Aryanpour, 2003] .....	44
Figura 7 - Variação das frequências dos saltos [Adaptado de Racic e Pavic, 2010a] .....	44
Figura 8 - Modelo de carregamento proposto por Bachmann e Ammann (1987) [Adaptado de Bachmann e Ammann (1987)].....	47
Figura 9 - Representação genérica da função de carregamento dinâmico (ALVES, 1997) .....	49
Figura 10 - Coeficientes de defasagem para as atividades (FAISCA, 2003) .....	50
Figura 11 - Valores dos coeficientes de Fourier para grupos de até 8.192 pessoas [Adaptado de Ellis e Ji, 2004a] .....	53
Figura 12 - Pessoas pulando sobre uma plataforma de força (MARTÍNEZ et al.,2016).....	56
Figura 13 - Resposta dinâmica do estádio de Twickenham [Adaptado de Ellis e Ji, 1997] .....	58
Figura 14 - Pessoa em pé sobre o sistema estrutural [Adaptado de Brownjohn, 1999] .....	59
Figura 15 - Resposta dinâmica da plataforma aos saltos de 2 Hz - parte 1 [Adaptado de Yao et al., 2002] .....	60
Figura 16 - Resposta dinâmica da plataforma aos saltos de 2 Hz - parte 2 [Adaptado de Yao et al., 2002] .....	60
Figura 17 - Resposta da plataforma aos saltos de 2 Hz - parte 1 [Adaptado de Yao et al., 2006].....	60
Figura 18 - Resposta da plataforma aos saltos de 2 Hz - parte 2 [Adaptado de Yao et al., 2006].....	61

Figura 19 - Modelo ser humano-estrutura [Adaptado de Dougill et al., 2006] .....	61
Figura 20 - Sistema composto por 3 graus de liberdade [Adaptado de Pavic e Reynolds, 2008] .....	62
Figura 21 - Estrutura monitorada durante os ensaios (SALYARDS; NOSS, 2014) ...	63
Figura 22 - Modelagem da interação dinâmica (CAPPELLINI, 2015) .....	64
Figura 23 - Visualização da postura das pessoas durante os testes realizados (He et al., 2017) .....	65
Figura 24 - FRF da estrutura ocupada com diferentes números de pessoas [Adaptado de Shahabpoor et al. (2017)] .....	66
Figura 25 - Saltos realizados sobre uma plataforma (Gaspar, 2018) .....	68
Figura 26 - Modelos biodinâmicos (MATSUMOTO; GRIFFIN, 2003) .....	70
Figura 27 - Comparação entre modelos biodinâmicos [Adaptado de Ji, Zhou e Zhang, 2013] .....	71
Figura 28 - Modelo de interação ativa com 1 grau de liberdade (SILVA; BRITO; PIMENTEL, 2013; TOSO et al., 2016) .....	72
Figura 29 - Modelo de interação ativa de 1 grau de liberdade (ZHANG; GEORGAKIS; CHEN, 2016) .....	74
Figura 30 - Direções dos sistemas de coordenadas (ISO 2631/1, 1985) .....	79
Figura 31 - Limites para aceleração em z (ISO 2631/1, 1985) .....	80
Figura 32 - Limites para aceleração em x ou y (ISO 2631/1, 1985) .....	80
Figura 33 - Direções dos sistemas de coordenadas para vibrações mecânicas influenciando pessoas (ISO 2631/1, 1997) .....	81
Figura 34 - Curvas de ponderação em função da frequência (ISO 2631/1, 1997) ....	82
Figura 35 - Zonas de precaução à saúde (ISO 2631/1, 1997) .....	84
Figura 36 - Curvas de ponderação $W_g$ e $W_d$ (SCI, 2009) .....	87
Figura 37 - Curva de ponderação $W_b$ (SCI, 2009) .....	87
Figura 38 - Fluxograma com as etapas necessárias para a realização dos ensaios	92
Figura 39 - Conjunto de equipamentos utilizados para a realização dos ensaios .....	93
Figura 40 - Croqui de posicionamento das células de carga .....	94
Figura 41 - Posicionamento do acelerômetro acoplado a pessoa .....	95
Figura 42 - Detalhe típico do acelerômetro acoplado a pessoa .....	95
Figura 43 - Balança digital .....	96
Figura 44 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 55 (m=81,85kg) .....	97

Figura 45 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 61 (m=88,65kg).....	98
Figura 46 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 94 (m=91,95kg).....	99
Figura 47 - Células de carga .....	100
Figura 48 - Acelerômetro Dytran .....	101
Figura 49 - Placa de MDF utilizada nos ensaios .....	101
Figura 50 - 1º modo de vibração da plataforma via análise experimental ( $f_{01}=62,3\text{Hz}$ ) .....	102
Figura 51 - Frequências da plataforma via análise numérica ( $f_{01}=62,2\text{Hz}$ ) .....	102
Figura 52 - Aplicativo metrônomo.....	103
Figura 53 - Sistema de aquisição de dados ADS 2002 .....	104
Figura 54 - Sistema de aquisição de dados ADS 2002 acoplado ao computador...	104
Figura 55 - Software AqDados .....	105
Figura 56 - Software AqDAnalysis.....	105
Figura 57 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 1 (m=92,70kg).....	106
Figura 58 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 1 (m=92,70kg).....	106
Figura 59 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 1 (m=92,70kg).....	107
Figura 60 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 1 (m=92,70kg).....	107
Figura 61 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 4 (m=103,20kg).....	107
Figura 62 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 4(m=103,20kg).....	107
Figura 63 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 4 (m=103,20kg).....	108
Figura 64 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 4 (m=103,20kg).....	108
Figura 65 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 7 (m=82,65kg).....	108
Figura 66 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 7 (m=82,65kg).....	108

Figura 67 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 7 (m=82,65kg).....	109
Figura 68 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 7 (m=82,65kg).....	109
Figura 69 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 10 (m=68kg).....	109
Figura 70 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 10 (m=68kg).....	109
Figura 71 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 10 (m=68kg).....	110
Figura 72 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 10 (m=68kg).....	110
Figura 73 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 16 (m=59,70kg).....	110
Figura 74 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 16 (m=59,70kg).....	110
Figura 75 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 16 (m=59,70kg).....	111
Figura 76 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 16 (m=59,70kg).....	111
Figura 77 - Representação genérica dos indivíduos representados por sistemas biodinâmicos com 1GL.....	114
Figura 78 - Vista superior da representação genérica dos indivíduos representados por sistemas biodinâmicos com 1GL.....	114
Figura 79 - Representação do ser humano sobre a plataforma.....	115
Figura 80 - Comparação: modelo numérico x modelo numérico computacional.....	115
Figura 81 - Estrutura básica de um algoritmo genético.....	118
Figura 82 - Espectros de força: Pessoa 1 (m=92,70kg).....	123
Figura 83 - Espectros de força: Pessoa 4 (m=103,20kg).....	123
Figura 84 - Espectros de força: Pessoa 7 (m=82,65kg).....	124
Figura 85 - Espectros de força: Pessoa 10(m=68kg).....	124
Figura 86 - Espectros de força: Pessoa 16 (m=59,70kg).....	124
Figura 87 - Relação Rigidez x Massa.....	127

Figura 88 - Relação Amortecimento x Rigidez .....	127
Figura 89 - Relação Amortecimento x Massa.....	128
Figura 90 - Planta do Estádio (LIMA, 2013) .....	130
Figura 91 - Corte do Estádio (LIMA, 2013).....	131
Figura 92 - Corte da arquibancada inferior.....	132
Figura 93 - Corte da arquibancada superior.....	132
Figura 94 - Vista interna do estádio durante a construção (LIMA, 2013) .....	134
Figura 95 - Vista externa do estádio durante a construção (LIMA, 2013) .....	135
Figura 96 - Detalhe do setor da arquibancada avaliado (LIMA, 2013) .....	135
Figura 97 - Vista externa do estádio após a reconstrução (CASTRO MELLO ARQUITETOS, 2014).....	136
Figura 98 - Vista interna do estádio após a reconstrução (CASTRO MELLO ARQUITETOS, 2014).....	136
Figura 99 - Vista interna de parte da arquibancada após a reconstrução (CASTRO MELLO ARQUITETOS, 2014).....	137
Figura 100 - Elemento SHELL63 (ANSYS, 2009) .....	139
Figura 101 - Elemento BEAM44 (ANSYS, 2009) .....	140
Figura 102 - Elemento COMBIN40 (ANSYS, 2009) .....	140
Figura 103 - 1º vista isométrica do modelo discretizado. ....	142
Figura 104 - 2º vista isométrica do modelo discretizado .....	142
Figura 105 - 3º vista isométrica do modelo discretizado .....	143
Figura 106 - 4º vista isométrica do modelo discretizado .....	143
Figura 107 - Vista da lateral esquerda do modelo discretizado.....	144
Figura 108 - Vista da lateral direita do modelo discretizado .....	144
Figura 109 - Vista de cima do modelo discretizado.....	145
Figura 110 - Vista frontal do modelo discretizado .....	145
Figura 111 - Vista da parte de trás do modelo discretizado .....	146
Figura 112 - 1º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{01}=0,97$ Hz) .....	150
Figura 113 - 2º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{02}=2,28$ Hz) .....	151
Figura 114 - 3º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{03}=2,47$ Hz) .....	152
Figura 115 - 4º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{04}=2,83$ Hz) .....	153
Figura 116 - 5º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{05}=5,12$ Hz) .....	154
Figura 117 - 6º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{06}=5,50$ Hz) .....	155

Figura 118 - 7º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{07}=5,57$ Hz) .....	156
Figura 119 - 8º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{08}=5,70$ Hz) .....	157
Figura 120 - 9º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{09}=5,75$ Hz) .....	158
Figura 121 - 10º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{10}=6,91$ Hz) .....	159
Figura 122 - Variação da frequência natural devido à presença das pessoas: 1º modo de vibração.....	164
Figura 123 - Variação da frequência natural devido à presença das pessoas: 2º modo de vibração.....	164
Figura 124 - Variação da taxa de amortecimento estrutural devido a presença das pessoas.....	166
Figura 125 - Situação de carregamento SC-1 .....	170
Figura 126 - Situação de carregamento SC-2 .....	171
Figura 127 - Situação de carregamento SC-3.....	171
Figura 128 - Situação de carregamento SC-4.....	172
Figura 129 - Situação de carregamento SC-5.....	172
Figura 130 - Situação de carregamento SC-6.....	173
Figura 131 - Situação de carregamento SC-7.....	173
Figura 132 - Situação de carregamento SC-8.....	174
Figura 133 - Situação de carregamento SC-9.....	174
Figura 134 - Situação de carregamento SC-10.....	175
Figura 135 - Situação de carregamento SC-11.....	175
Figura 136 - Situação de carregamento SC-12.....	176
Figura 137 - Situação de carregamento SC-13.....	176
Figura 138 - Situação de carregamento SC-14.....	177
Figura 139 - Situação de carregamento SC-15.....	177
Figura 140 - Situação de carregamento SC-16.....	178
Figura 141 - Posicionamento dos pontos de leitura .....	180
Figura 142 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-4 (ponto de análise 4).....	181
Figura 143 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-5 (ponto de análise 4).....	181
Figura 144 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-9 (ponto de análise 8).....	181
Figura 145 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-10 (ponto de análise 8).....	182
Figura 146 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-14 (ponto de análise 11)....	182
Figura 147 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-15 (ponto de análise 11)....	182

Figura 148 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-16 (ponto de análise 4).....	183
Figura 149 - Aceleração no domínio do tempo: SC-4 (ponto de análise 4).....	183
Figura 150 - Aceleração no domínio do tempo: SC-5 (ponto de análise 4).....	183
Figura 151 - Aceleração no domínio do tempo: SC-9 (ponto de análise 8).....	184
Figura 152 - Aceleração no domínio do tempo: SC-10 (ponto de análise 8).....	184
Figura 153 - Aceleração no domínio do tempo: SC-14 (ponto de análise 11).....	184
Figura 154 - Aceleração no domínio do tempo: SC-15 (ponto de análise 11).....	185
Figura 155 - Aceleração no domínio do tempo: SC-16 (ponto de análise 4).....	185
Figura 156 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-4 (ponto de análise 4) .	186
Figura 157 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-5 (ponto de análise 4) .	187
Figura 158 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-9 (ponto de análise 8) .	187
Figura 159 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-10 (ponto de análise 8) .....	187
Figura 160 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-14 (ponto de análise 11) .....	188
Figura 161 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-15 (ponto de análise 11) .....	188
Figura 162 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-16 (ponto de análise 4) .....	188
Figura 163 - Aceleração no domínio da frequência: SC-4 (ponto de análise 4) .....	189
Figura 164 - Aceleração no domínio da frequência: SC-5 (ponto de análise 4) .....	189
Figura 165 - Aceleração no domínio da frequência: SC-9 (ponto de análise 8) .....	189
Figura 166 - Aceleração no domínio da frequência: SC-10 (ponto de análise 8) ....	190
Figura 167 - Aceleração no domínio da frequência: SC-14 (ponto de análise 11) ..	190
Figura 168 - Aceleração no domínio da frequência: SC-15 (ponto de análise 11) ..	190
Figura 169 - Aceleração no domínio da frequência: SC-16 (ponto de análise 4) ....	191
Figura 170 - Espectros de deslocamento, no domínio do tempo: SC-1 e SC-5 (ponto de leitura 4) .....	192
Figura 171 - Espectros de deslocamento, no domínio da frequência: SC-1 e SC-5 (ponto de leitura 4) .....	192
Figura 172 - Espectros de aceleração, no domínio do tempo: SC-1 e SC-5 (ponto de leitura 4) .....	192



Figura 173 - Espectros de aceleração, no domínio da frequência: SC-1 e SC-5 (ponto de leitura 4) .....	193
Figura 174 - Força otimizada: Pessoa 1 (m=92,70kg).....	215
Figura 175 - Força otimizada: Pessoa 4 (m=103,20kg).....	215
Figura 176 - Força otimizada: Pessoa 7 (m=82,65kg).....	215
Figura 177 - Força otimizada: Pessoa 10 (m=68kg) .....	216
Figura 178 - Força otimizada: Pessoa 16 (m=59,70kg).....	216
Figura 179 - Força: situações de carregamento SC-1 a SC-5 e SC-7 a SC-16 (T=0,45s, T <sub>c</sub> =0,32s, K <sub>p</sub> =3,24 e CD=0,55).....	217
Figura 180 - Força: situação de carregamento SC-6 (T=0,45s, T <sub>c</sub> =0,32s, K <sub>p</sub> =3,24 e CD=0,58).....	218
Figura 181 - Força: situações de carregamento SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16 (p=100).....	219
Figura 182 - Força: situação de carregamento SC-6 (p=43).....	219
Figura 183 - Força: situação de carregamento SC-7 (p=86).....	219
Figura 184 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-5 (ponto de análise 4).....	220
Figura 185 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-10 (ponto de análise 8).....	220
Figura 186 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-15 (ponto de análise 11).....	221
Figura 187 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-16 (ponto de análise 4).....	221
Figura 188 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-5 (ponto de análise 4).....	221
Figura 189 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-10 (ponto de análise 8).....	222
Figura 190 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-15 (ponto de análise 11).....	222
Figura 191 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-16 (ponto de análise 4).....	222

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequências características de cantos acompanhados de saltos de torcidas de futebol (LIMA, 2013) .....	38
Tabela 2 - Carga estática equivalente de carregamentos dinâmicos de acordo com alguns autores (JONES; REYNOLDS; PAVIC, 2011; MCDONALD, 2015).....	45
Tabela 3 - Parâmetros utilizados na função de carregamento (FAISCA, 2003).....	50
Tabela 4 - Parâmetros utilizados na função de carregamento (ELLIS; JI, 2004a) ....	52
Tabela 5 - Valores dos coeficientes de Fourier para grupos de até 8.192 pessoas (ELLIS; JI, 2004a) .....	54
Tabela 6 - Faixas de frequências para espectadores saltando (MACA; ROKOS, 2017).....	57
Tabela 7 - Força dura gerada pela pessoa sobre a plataforma de força (GASPAR, 2018).....	68
Tabela 8 - Deslocamentos, velocidades e acelerações das pessoas (GASPAR, 2018) .....	69
Tabela 9 - Frequência natural mínima requerida (NBR 6118, 2014).....	76
Tabela 10 - Limites de aceleração (ISO 2631/1, 1997).....	82
Tabela 11 - Faixas de frequência para os primeiros harmônicos (CEB209, 1991) ...	85
Tabela 12 - Faixas de percepção humana devido à vibração vertical (CEB 209, 1991) .....	86
Tabela 13 - Reação a vários níveis de aceleração em arquibancadas em termos da aceleração da gravidade- $g = 9,81 \text{ m / s}^2$ (SCI, 2009).....	88
Tabela 14 - Limites de aceleração em <i>rms</i> (ISO 2631/1, 1997).....	89
Tabela 15 - Limites de aceleração em <i>rms</i> (SCI, 2009).....	89
Tabela 16 - Limites de aceleração em VDV (SETAREH, 2012).....	89
Tabela 17 - Limites de aceleração em VDV (ELLIS E LITTLER, 2004) .....	90
Tabela 18 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 1 a 25 .....	121
Tabela 19 - Valores estatísticos das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos .....	122
Tabela 20 - Correlação de Pearson das pessoas 1 a 25 .....	125

Tabela 21 - Coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis .....	126
Tabela 22 - Dados obtidos a partir de regressões.....	126
Tabela 23 - Características presentes no modelo numérico-computacional .....	141
Tabela 24 - Frequências naturais da arquibancada vazia.....	149
Tabela 25 - Descrição dos modos de vibração .....	160
Tabela 26 - Características do modelo estrutural com carregamento: 1º modo de vibração.....	162
Tabela 27 - Características do modelo estrutural com carregamento: 2º modo de vibração.....	162
Tabela 28 - Situações de carregamento investigadas.....	169
Tabela 29 - Posicionamento dos pontos de leitura.....	179
Tabela 30 - Acelerações verticais máximas: SC-1 (Figura 125).....	194
Tabela 31 - Acelerações verticais máximas: SC-2 (Figura 126).....	195
Tabela 32 - Acelerações verticais máximas: SC-3 (Figura 127).....	196
Tabela 33 - Acelerações verticais máximas: SC-4 (Figura 128).....	197
Tabela 34 - Acelerações verticais máximas: SC-5 (Figura 129).....	198
Tabela 35 - Acelerações verticais máximas: SC-6 (Figura 130).....	199
Tabela 36 - Acelerações verticais máximas: SC-7 (Figura 131).....	200
Tabela 37 - Acelerações verticais máximas: SC-8 (Figura 132).....	201
Tabela 38 - Acelerações verticais máximas: SC-9 (Figura 133).....	202
Tabela 39 - Acelerações verticais máximas: SC-10 (Figura 134).....	203
Tabela 40 - Acelerações verticais máximas: SC-11 (Figura 135).....	204
Tabela 41 - Acelerações verticais máximas: SC-12 (Figura 136).....	205
Tabela 42 - Acelerações verticais máximas: SC-13 (Figura 137).....	206
Tabela 43 - Acelerações verticais máximas: SC-14 (Figura 138).....	207
Tabela 44 - Acelerações verticais máximas: SC-15 (Figura 139).....	208
Tabela 45 - Acelerações verticais máximas: SC-16 (Figura 140).....	209
Tabela 46 - Limites de aceleração em <i>rms</i> (ISO 2631/1, 1997) .....	212
Tabela 47 - Limites de aceleração em <i>rms</i> (SCI, 2009) .....	212
Tabela 48 - Limites de aceleração em VDV (SETAREH, 2012).....	212
Tabela 49 - Limites de aceleração em VDV (ELLIS; LITTLER, 2004).....	213
Tabela 50 - Acelerações verticais máximas .....	213
Tabela 51 - Comparativo das acelerações de pico: SC-5 .....	224

Tabela 52 - Comparativo das acelerações de pico: SC-10 .....	225
Tabela 53 - Comparativo das acelerações de pico: SC-15 .....	226
Tabela 54 - Comparativo das acelerações de pico: SC-16 .....	227
Tabela 55 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 1 a 25 .....	255
Tabela 56 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 26 a 50 .....	256
Tabela 57 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 51 a 75 .....	257
Tabela 58 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 76 a 100 .....	258
Tabela 59 - Correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 1 a 25 .....	259
Tabela 60 - Correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 26 a 50 .....	260
Tabela 61 - Correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 51 a 75 .....	261
Tabela 62 - Correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 76 a 100 .....	262
Tabela 63 - Dimensões das lajes .....	263
Tabela 64 - Dimensões dos pilares: 1º e 2º linha .....	263
Tabela 65 - Dimensões dos pilares: 3º e 4º linha .....	263
Tabela 66 - Dimensões das vigas transversais: até 1º e 2º linha de pilares .....	264
Tabela 67 - Dimensões das vigas transversais: até 1º e 2º linha de pilares .....	264
Tabela 68 - Dimensões das vigas internas .....	264
Tabela 69 - Características dinâmicas das pessoas 1 a 25: SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16 .....	265
Tabela 70 - Características dinâmicas das pessoas 26 a 50: SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16 .....	266
Tabela 71 - Características dinâmicas das pessoas 51 a 75: SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16 .....	267
Tabela 72 - Características dinâmicas das pessoas 76 a 100: SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16 .....	268

Tabela 73 - Características dinâmicas das pessoas 1 a 25: SC-6 .....	269
Tabela 74 - Características dinâmicas das pessoas 26 a 43: SC-6 .....	270
Tabela 75 - Características dinâmicas das pessoas 1 a 7: SC-7 .....	270
Tabela 76 - Características dinâmicas das pessoas 8 a 35: SC-7 .....	271
Tabela 77 - Características dinâmicas das pessoas 36 a 63: SC-7 .....	272
Tabela 78 - Características dinâmicas das pessoas 64 a 86: SC-7 .....	273

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADS	Sistema de Aquisição de Dados
AISC	American Institute of Steel Construction
AG	Algoritmo Genético
ANSYS	Swanson Analysis Systems
BS	British Standards Institution
CEB	Comité Euro-international du Béton
FDN	Força Dinâmica Normalizada
FFT	Transformada Rápida de Fourier
FRF	Função de Resposta em Frequência
GLF	Generated Load Factor
ISO	International Organization for Standardization
JWG	Joint Working Group
MDF	Medium Density Fiberboard
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
NBC	National Building Code of Canada
NRCC	National Research Council Canada
RMS	Root Mean Square
SCI	The Steel Construction Institute
S1GL	Sistema com um Grau de Liberdade
VDV	Valores em Dose de Vibração

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_p$	aceleração de pico
$a_i$	aceleração do indivíduo $i$ ao longo do tempo
$a_{rms}$	aceleração <i>rms</i>
$a_w$	aceleração ponderada
$a_{w1}$	aceleração ponderada, em <i>rms</i> , para a primeira exposição
$a_{w2}$	aceleração ponderada, em <i>rms</i> , para a segunda exposição
$a_{wx}$	aceleração <i>rms</i> ponderada do eixo ortogonal $x$
$a_{wy}$	aceleração <i>rms</i> ponderada do eixo ortogonal $y$
$a_{wz}$	aceleração <i>rms</i> ponderada do eixo ortogonal $z$
$A(\omega_j)$	transformada de Fourier da aceleração ( $j$ -ésimo harmônico)
acelfpa1	aceleração experimental do indivíduo
bpm	batidas por minuto
$c_{ha}$	amortecimento do ser humano ativo
$c_i$	amortecimento associado ao indivíduo $i$
$c$	amortecimento do ser humano
CD	coeficiente de defasagem
cm	centímetro
corr_1	correlação entre forças
$d_p$	deslocamento de pico
$d_{rms}$	deslocamento <i>rms</i>
deslfpa1	deslocamento experimental do indivíduo
$E_{cs}$	módulo de elasticidade longitudinal secante
$f$	frequência
$f_n$	frequência natural
$f_p$	frequência do passo ou da atividade
$F(t)$	força da atividade humana ao longo do tempo (força dura)
$F_{bio}(t)$	força biodinâmica do caminhar humano
$f_{crítica}$	frequência crítica
$F_d$	força otimizada
$F_{d1}$	força experimental do indivíduo

$F_{exp}$	força experimental do indivíduo
$F_i(t)$	força produzida pelo indivíduo $i$
$f_{obj}$	função a ser minimizada através do AG
$f_n$	frequência natural da estrutura
$F_p$	força de pico
$F_{rms}$	força <i>rms</i>
$g$	aceleração da gravidade
$G$	peso
$h_{degrau}$	altura do degrau da arquibancada
Hz	hertz
$i$	múltiplo harmônico da frequência do passo
$k_{ha}$	rigidez do ser humano ativo
$k_i$	rigidez associada ao indivíduo $i$
$k$	rigidez do ser humano
$K_p$	coeficiente de impacto
$k_x$	constante de multiplicação para atividades rítmicas do eixo $x$
$k_y$	constante de multiplicação para atividades rítmicas do eixo $y$
$k_z$	constante de multiplicação para atividades rítmicas do eixo $z$
kPa	quilopascal
$m$	massa do ser humano
$m_{ha}$	massa do ser humano ativo
$m_i$	massa associada ao indivíduo $i$
$m$	metro
mm	milímetros
$m/s^{1,75}$	metro por segundo elevado a 1,75 (um vírgula setenta e cinco)
$m/s^2$	metro por segundo ao quadrado
$M_h$	massa estática do indivíduo
$M_p$	massa das pessoas
$M_e$	massa das arquibancadas
$n$	número de elementos ou termos
N	newton
P	peso da pessoa
$P_{gnd}$	força de reação do piso (rígido)



$P'_{\text{gnd}}$	força de reação do piso (em vibração)
rms	valor quadrático médio ( <i>root mean square</i> )
r	coeficiente de correlação de Pearson
$r_{n,v}$	coeficiente de Fourier normalizado associado ao n-ésimo harmônico
s	segundo
t	tempo
$t_1$	duração correspondente à primeira exposição
$t_2$	duração correspondente à segunda exposição
T	período da atividade rítmica
$T_c$	período de contato
$T_s$	período sem contato
$u_{\text{ha}}$	deslocamento do ser humano ativo
VDV	valor de dose de vibração ( <i>vibration dose value</i> )
v	número de pessoas
$v_i$	velocidade do indivíduo i ao longo do tempo
$v_p$	velocidade de pico
$v_{\text{rms}}$	velocidade rms
velfpa1	velocidade experimental do indivíduo
$W_d$	coeficiente de ponderação nos eixos x e y
$W_d$	coeficiente de ponderação no eixo z
$x_i$	elemento da primeira variável
$x_i(t)$	deslocamento do indivíduo i ao longo do tempo
$x(1)$	amortecimento do indivíduo a ser determinada através da otimização
$x(2)$	rigidez do indivíduo a ser determinada através da otimização
$\bar{x}$	media dos valores de $x_i$
$y_i$	elemento da segunda variável
$\bar{y}$	média dos valores de $y_i$
$\alpha$	razão de contato ( $T_c/T$ )
$\Delta t$	intervalo de integração
$\gamma_c$	densidade
$\xi$	fator ou taxa de amortecimento
$\xi_i$	fator ou taxa de amortecimento do modo i
$\delta$	decremento logarítmico

$\omega$	frequência angular da força externa
$\omega_{0i}$	frequência natural circular do modo i
$\omega_j$	frequência angular associada ao j-ésimo harmônico
$\phi_n$	diferença de fase associada ao n-ésimo harmônico
$\nu$	coeficiente de Poisson

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>28</b>
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>33</b>
<b>1.1 Análise de vibrações de sistemas estruturais submetidos a atividades humanas rítmicas</b> .....	<b>33</b>
<b>1.2 Caracterização dinâmica de atividades humanas rítmicas</b> .....	<b>42</b>
1.2.1 Modelos de carga estática equivalente .....	45
1.2.2 Modelos periódicos .....	46
<b>1.3 Interação dinâmica indivíduo-estrutura</b> .....	<b>57</b>
<b>1.4 Modelagem biodinâmica do carregamento devido a atividades humanas rítmicas</b> .....	<b>69</b>
<b>1.5 Critérios de conforto humano</b> .....	<b>75</b>
1.5.1 Norma Brasileira - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado: NBR 6118 (2014) .....	76
1.5.2 Norma Brasileira - Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios: NBR 8800 (2008) .....	77
1.5.3 Norma ISO - International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibrations): ISO 2631/1 (1985) .....	78
1.5.4 Norma ISO - International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibrations): ISO 2631/1 (1997) .....	81
1.5.5 CEB 209 (1991) .....	85
1.5.6 Guia do SCI/2009 .....	86
1.5.7 Critérios utilizados .....	88
<b>1.6 Considerações do capítulo</b> .....	<b>90</b>
<b>2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>91</b>
<b>2.1 Descrição dos testes experimentais</b> .....	<b>91</b>
<b>2.2 Equipamentos utilizados nos ensaios</b> .....	<b>100</b>

2.3	Respostas dinâmicas obtidas nos testes experimentais.....	106
2.4	Considerações do capítulo .....	112
3	<b>MODELAGEM DOS SISTEMAS BIODINÂMICOS .....</b>	<b>113</b>
3.1	Modelagem biodinâmica proposta.....	113
3.2	Determinação das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos 116	
3.2.1	Consideração realizadas no processo de otimização.....	118
3.2.2	Desenvolvimento do processo de otimização.....	119
3.3	Considerações do capítulo .....	128
4	<b>MODELO ESTRUTURAL.....</b>	<b>129</b>
4.1	Modelo Estrutural do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha .....	129
4.2	Considerações do capítulo .....	137
5	<b>MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>138</b>
5.1	Modelagem numérico-computacional.....	138
5.2	Modelagem do amortecimento estrutural.....	146
5.3	Considerações do capítulo .....	148
6	<b>ANÁLISE MODAL.....</b>	<b>149</b>
6.1	Análise das frequências naturais (autovalores) e dos modos de vibração (autovetores) considerando a arquibancada vazia .....	149
6.2	Análise das frequências naturais (autovalores) e dos modos de vibração (autovetores) considerando a arquibancada ocupada .....	161
6.3	Influência da ocupação da arquibancada nas frequências naturais.....	163
6.4	Influência da ocupação da arquibancada no amortecimento estrutural.....	165
6.5	Considerações do capítulo .....	166
7	<b>ANÁLISE TRANSIENTE E ESTUDO DO CONFORTO HUMANO .....</b>	<b>168</b>
7.1	Definição das situações de carregamento (sistemas biodinâmicos).....	168
7.2	Posicionamento dos pontos de leitura para obtenção das respostas dinâmicas.....	178

<b>7.3</b>	<b>Estudo do comportamento estrutural dinâmico global: modelos biodinâmicos</b> .....	<b>180</b>
7.3.1	Domínio do tempo .....	180
7.3.2	Domínio da frequência.....	186
7.3.3	Comparação entre as situações de carregamento SC-1 e SC-5.....	191
<b>7.4</b>	<b>Análise quantitativa das situações de carregamento: modelos biodinâmicos</b> .....	<b>193</b>
<b>7.5</b>	<b>Análise do conforto humano</b> .....	<b>211</b>
<b>7.6</b>	<b>Análise dos resultados: sistemas biodinâmicos <i>versus</i> modelos de "força dura"</b> .....	<b>214</b>
7.6.1	Parâmetros utilizados no modelo biodinâmico proposto.....	214
7.6.2	Parâmetros utilizados no modelo de "força dura" desenvolvido por Faisca (2003).....	216
7.6.3	Parâmetros utilizados no modelo de "força dura" presente no SCI (2009) ...	218
7.6.4	Resultados obtidos .....	220
<b>7.7</b>	<b>Considerações do capítulo</b> .....	<b>229</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>230</b>
<b>8.1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>230</b>
<b>8.2</b>	<b>Conclusões Alcançadas</b> .....	<b>232</b>
<b>8.3</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	<b>239</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>240</b>
	<b>APÊNDICE A – Valores das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos da modelagem biodinâmica proposta das pessoas 1 a 100</b> .....	<b>255</b>
	<b>APÊNDICE B – Valores da correlação de Pearson entre a força experimental (<math>F_{d1}</math>) e a força otimizada (<math>F_d</math>) das pessoas 1 a 100</b> .....	<b>259</b>
	<b>APÊNDICE C – Geometria da estrutura</b> .....	<b>263</b>
	<b>APÊNDICE D – Características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos consideradas para as situações de carregamento SC-1 a SC-16</b> .....	<b>265</b>

## INTRODUÇÃO

A forte tendência em projetar estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis faz com que exista uma redução nos valores de suas frequências naturais, o que possibilita que tais estruturas sejam mais suscetíveis aos carregamentos dinâmicos. Nesse sentido, as frequências naturais dos sistemas estruturais podem passar a ficar cada vez mais próximas das frequências de excitação oriundas das ações dinâmicas humanas, o que pode levar a ocorrência do fenômeno da ressonância. Devido a este motivo, torna-se muito importante a verificação do comportamento dinâmico das estruturas, bem como a descrição das cargas dinâmicas que atuam sobre elas. Essas cargas podem produzir níveis de vibrações elevados, podendo gerar desconforto humano, além de pôr em risco a segurança da própria estrutura (CAMPISTA; SILVA, 2018a; CAMPISTA; SILVA, 2018b; CAMPISTA, D., 2015; FAISCA, 2003).

Os estádios de futebol, além de serem utilizados para a realização de jogos de futebol, também têm sido utilizados frequentemente para sediar diversos eventos com apresentações musicais. Nessas situações, estímulos externos, como por exemplo, a entrada dos jogadores em campo antes do início do jogo, o acontecimento de um gol dos times que estão jogando e a entoação de uma canção em um show, resultam na prática de atividade rítmica humana com um alto grau de sincronização. Em alguns dos acontecimentos descritos acima, as vibrações oriundas do carregamento dinâmico humano podem ser elevadas, podendo causar um desconforto humano e até mesmo levar pânico à multidão que está ocupando as arquibancadas dos estádios de futebol.

Os sistemas estruturais dos estádios de futebol mostram variações significativas especialmente em relação à massa, rigidez e amortecimento. Estas variações são produto de alguns fatores, como por exemplo, a distribuição desigual da multidão ocupando a estrutura, a capacidade inerente do corpo humano para absorver energia, as interações entre as pessoas, e também as diferenças de movimento dentro de seu próprio corpo (postura e reação a diferentes eventos) (CATBAS et al., 2017).

É importante descrever o carregamento proveniente de atividades humanas rítmicas de uma forma mais condizente com a realidade para a realização do estudo

do comportamento dos sistemas estruturais. Antigamente, na investigação do comportamento estrutural era utilizada a hipótese de uma carga estática equivalente. Nos últimos anos têm sido amplamente utilizadas as funções matemáticas que possuem como base a realização de testes experimentais. Mais recentemente o emprego de modelos biodinâmicos começou a ser estudado, uma vez que representa de forma mais realista o carregamento humano, por levar em consideração a interação dinâmica indivíduo-estrutura, além das propriedades mecânicas do corpo humano.

Diversos autores investigaram a representação da ação dinâmica humana por intermédio de funções matemáticas, com o objetivo de realizar uma melhor avaliação ainda dentro da fase de projeto do nível de vibrações em que as estruturas estão submetidas, além de avaliar o nível de conforto humano dos usuários (BACHMANN et al., 1995; ISSO 10137, 2007; SMITH et al., 2009; MURRAY et al., 2016). Estas funções matemáticas podem superestimar ou subestimar a resposta estrutural, sendo soluções mais ou menos conservadoras em relação ao custo final do projeto (CAPPELLINI, 2015; GASPAR, 2015).

Estudos recentes têm apresentado de uma maneira mais realista o contato da atividade humana nos sistemas estruturais através do estudo da interação dinâmica indivíduo-estrutura, através da modelagem biodinâmica. A modelagem biodinâmica considera que as propriedades dinâmicas humanas (massa, rigidez e amortecimento) estão atuando sobre os sistemas estruturais. Essa modelagem tem se mostrado como uma maneira mais econômica de se considerar as ações dinâmicas humanas (CAMPISTA; SILVA, 2018b; JOINT WORKING GROUP, 2008; JONES et al., 2011; SILVA et al., 2013; CAPPELLINI, 2015; VAN NIMMEN, 2015; SHAHABPOOR; PAVIC; RACIC, 2016; TOSO et al., 2016).

## **Motivação**

Os engenheiros civis que trabalham com projetos de estruturas têm sido motivados a realizarem investigações cada vez mais minuciosas relacionadas à avaliação de vibrações excessivas, tendo em mente o atendimento aos critérios de conforto humano. Tal fato se justifica devido à tendência atual referente ao projeto de estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis. Neste sentido, tem-se buscado

projetar sistemas estruturais capazes de atender aos critérios de conforto humano, evitando assim o surgimento de problemas relacionados às vibrações excessivas, por exemplo, decorrentes de ações dinâmicas humanas rítmicas. Este trabalho de pesquisa apresenta como principal motivação o desenvolvimento de um estudo baseado na realização de uma série extensa de testes experimentais para a obtenção das características dinâmicas das pessoas, objetivando simular numericamente a interação dinâmica indivíduo-estrutura, de maneira mais realista, com ênfase especial para a verificação do conforto humano sobre o projeto de arquibancadas de estádios de futebol.

## **Objetivo**

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal o estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do desempenho do sistema estrutural de arquibancadas de estádios de futebol quando submetidas a ações dinâmicas humanas provenientes das torcidas. Para a realização deste estudo foram avaliadas as arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha, que foi reconstruído para ser utilizado durante a Copa do Mundo de 2014, realizada no Brasil.

A modelagem das ações dinâmicas representativas das torcidas foi desenvolvida com base no emprego de modelos biodinâmicos acoplados ao sistema estrutural das arquibancadas, onde o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura considera o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL). Este modelo foi calibrado com base em resultados obtidos mediante a realização de testes experimentais, representativos da ação rítmica da torcida. As características dinâmicas das pessoas (massa, rigidez e amortecimento) foram determinadas a partir da resolução matemática de um problema clássico de otimização, via uso do programa MATLAB (2017), através do emprego de algoritmos genéticos (AG). Cabe ressaltar que a obtenção das características dinâmicas humanas foi efetuada a partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados, onde os indivíduos praticavam a atividade rítmica humana (atividade de torcida).



Em seguida, a resposta estrutural dinâmica das arquibancadas investigadas, determinada a partir da utilização da modelagem biodinâmica do carregamento foi comparada com os resultados obtidos através do emprego de dois modelos de carregamento dinâmico, onde o carregamento é aplicado diretamente sobre a estrutura (modelos de “força-dura”) (FAISCA, 2003; SCI, 2009).

Finalmente, com base em análises críticas acerca dos valores das acelerações, determinados para uma série de situações de carregamento distintas, estes foram comparados com os limites propostos por normas e recomendações de projeto, com o objetivo de avaliar de modo mais realista o problema de vibrações excessivas sobre modelos de arquibancadas em estádios de futebol, verificando se o sistema estrutural das arquibancadas atende às condições de conforto humano dos usuários.

## **Estrutura da Tese**

O presente capítulo apresentou o objetivo e as motivações para o desenvolvimento deste trabalho e com a finalidade dos mesmos serem atendidos este trabalho está subdividido em oito capítulos, descritos a seguir.

No primeiro capítulo é realizada uma revisão bibliográfica, com a apresentação de trabalhos de diversos autores, com relação ao comportamento de sistemas estruturais, principalmente de estádios de futebol, quando submetidos a carregamentos devido a atividades humanas.

No segundo capítulo é realizada a descrição dos ensaios experimentais realizados em laboratório bem como os equipamentos empregados para a realização dos objetivos desta tese.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia utilizada na determinação dos parâmetros do modelo biodinâmico proposto para simular a interação dinâmica indivíduo-estrutura nas análises numéricas.

No quarto capítulo é apresentada a descrição do modelo estrutural utilizado na análise e todos os detalhes pertinentes, com a descrição de dimensões do estádio estudado, características dos materiais e suas propriedades físicas, além dos pontos de aplicação do carregamento.

No quinto capítulo é apresentada a modelagem em elementos finitos do sistema estrutural, os tipos de elementos finitos adotados na modelagem numérico-computacional e a modelagem do amortecimento estrutural.

No sexto capítulo é realizada a análise modal da estrutura, onde são apresentadas as análises de autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração). Também foi elaborada uma comparação dos valores das frequências naturais com os critérios normativos, além de uma análise mais apurada a cerca da variação nos valores das frequências naturais e do amortecimento, ao se considerar a utilização de sistemas biodinâmicos simulando o ser humano parado sobre a estrutura.

No sétimo capítulo é apresentada a análise dinâmica da estrutura, quando submetida à atividade humana, através dos valores das acelerações no domínio do tempo e da frequência, onde os referidos valores são avaliados quanto aos critérios de conforto humano.

No oitavo capítulo são apresentadas as conclusões, de forma que seja possível contribuir para o avanço desta linha de pesquisa, assim como propostas para trabalhos futuros.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O comportamento de sistemas estruturais e a reação humana diante da vibração gerada pelo carregamento dinâmico têm sido assuntos estudados por diversos pesquisadores durante os últimos anos. Ressalta-se que, na última década, pode ser observado um crescente aumento na quantidade de relatos de problemas relacionados a vibrações excessivas causadas pela ação dinâmica humana. Neste sentido, o presente capítulo apresenta trabalhos de diversos autores que estudam esta temática, principalmente no que diz respeito à análise de vibrações de sistemas estruturais submetidos a atividades humanas rítmicas, assim como a caracterização dinâmica do carregamento, a interação dinâmica indivíduo-estrutura, além da modelagem biodinâmica do carregamento e, por fim, são apresentados diversos critérios para avaliação do conforto humano.

### 1.1 Análise de vibrações de sistemas estruturais submetidos a atividades humanas rítmicas

Durante as últimas décadas foi observado o crescente aumento de relatos de problemas relacionado a vibrações excessivas de estruturas devido à presença humana. Isso se deve ao carregamento humano influenciar no comportamento dos sistemas estruturais, causando alterações nos parâmetros dinâmicos dos sistemas estruturais (massa modal, rigidez modal e amortecimento modal). Portanto, tornou-se muito importante a realização da análise de vibrações de sistemas estruturais e a seguir se encontram alguns trabalhos que trataram sobre o referido tema.

Ellis e Ji (1994) ressaltam que pode haver carregamentos sincronizados em eventos onde o público é mais agitado como em jogos de futebol, podendo acarretar problemas de vibração. Ainda segundo o ponto de vista do comportamento vibratório, outro aspecto a considerar é a interação do público com a estrutura, que pode afetar o comportamento dinâmico da mesma, no sentido de aumentar ou diminuir os níveis de vibração resultantes, em função do número e do comportamento do público na estrutura.

Em seu estudo, Takabatake (1998) realizou uma investigação a cerca dos efeitos da massa do ser humano nas deflexões dinâmicas de uma laje de concreto. O autor verificou que a massa da laje de concreto era cerca de 720.600kg. Ainda de

acordo com o autor, ao se considerar a massa de um ser humano igual a 65kg, obtém-se uma relação  $M_p/M_e$  (massa do ser humano / massa da estrutura) igual a 0,00009, portanto concluiu-se que o efeito da massa de um ser humano nessa estrutura era insignificante.

Rodrigues e Almeida (2003) estudaram o carregamento dinâmico produzido pela ação da torcida em quatro estádios de futebol: o Estádio Governador Plácido Castelo (Castelão), o Estádio Ícaro de Castro Melo (Ibirapuera), o Estádio Cícero Pompeu de Toledo (Morumbi) e o Estádio Jornalista Mário Filho (Maracanã). Para tal estudo, determinaram parâmetros que caracterizaram as variações deste tipo de carregamento, no tempo e no espaço, utilizando modelos estatísticos e análise numérica em elementos finitos.

Juliani et al. (2003) analisaram as arquibancadas do Estádio Palestra Itália, através de ensaios dinâmicos de vibração forçada realizados em cinco setores das arquibancadas. Os setores estudados possuem sistemas estruturais não coincidentes entre si, portanto foram comparados os comportamentos dinâmicos de todos os setores, além da análise do conforto humano durante a ocorrência das vibrações em eventos com a presença de grande público. Comparando os resultados obtidos dos cinco setores, verificou-se que os setores que eram compostos por estruturas aporticadas de dois apoios possuíam frequência natural para os modos de vibração verticais, na faixa de 2Hz a 3Hz, que sincronizam com as frequências produzidas pelo público, causando vibrações acima dos limites admissíveis. Portanto, concluíram que as estruturas mais adequadas para suportar os esforços dinâmicos em arquibancadas de estádios são as estruturas aporticadas compostas por mais de dois pilares de apoio.

Juliani et al. (2005) em seu trabalho, avaliaram o comportamento das arquibancadas do Estádio Olímpico João Havelange, localizado no Rio de Janeiro, utilizando simulação numérica e monitoração. Os resultados das acelerações máximas, obtidos nos ensaios dinâmicos, foram comparados com os limites propostos pelo CEB 209 (1991) e assim foi verificado que esses valores ficaram entre os limites de desagradável e intolerável. Com o objetivo de minimizar essas acelerações máximas produzidas pelo público e garantir um maior conforto ao mesmo, optou-se por aumentar a inércia da seção transversal da estrutura. A análise numérica foi realizada com cinco diferentes modelos, que se diferem com relação a

ligação entre as peças. A análise numérica mostrou que as peças trabalhando isoladamente possuem a primeira frequência natural próxima da frequência de excitação do público. Já nos modelos que possuíam ligação entre as peças foi verificado que o comportamento da estrutura se alterou, afastando a primeira frequência natural da frequência de excitação do público, reduzindo assim as amplificações geradas pelos efeitos dinâmicos. Foi verificado que as acelerações em todos os casos superaram os limites de claramente perceptível, portanto, apontam que existem situações em que o público notará a vibração dos elementos estruturais.

Sim (2006) estudou diferentes modelos numéricos de multidão para arquibancadas e pode ser visto neste estudo que a relação entre a massa da estrutura e a massa do público influencia nos valores das frequências naturais, inclusive sobre reduções na direção vertical. A flexibilidade da estrutura para as cargas verticais pode causar deslocamentos horizontais excessivos, além de estar relacionada às baixas frequências naturais.

Reynolds e Pavic (2006) investigaram o comportamento da arquibancada do Estádio Elland Road, em Leeds, no Reino Unido. Foi realizado um monitoramento durante um jogo de futebol internacional, onde o estádio estava totalmente ocupado. As propriedades modais foram obtidas a partir de testes sobre a estrutura vazia. Verificou-se que a quantidade de pessoas presentes sobre as arquibancadas de um estádio pode alterar significativamente as propriedades modais da estrutura e que estas mudanças variam de acordo com a configuração das pessoas presentes ao longo da arquibancada (sentadas, em pé, etc.).

Salyards e Hanagan (2007) monitoraram durante um período um estádio durante vários eventos esportivos. De acordo com o estudo, o movimento da torcida sobre as arquibancadas resulta em vibração da estrutura, sendo que quanto mais coordenado é o movimento da torcida, maior é a vibração encontrada. Segundo os autores, as vibrações encontradas durante a reação da torcida em um grande jogo de futebol não eram tão graves quanto as vibrações encontradas durante uma batida musical. Além disso, foi verificado que em eventos onde a atividade rítmica é mais provável, será produzido maior movimento da estrutura, gerando um potencial para problemas de manutenção.

Brownjohn e Middleton (2008) avaliaram alguns casos em estruturas rígidas, com frequências naturais acima de 10 Hz e concluíram que os harmônicos mais

altos devido ao caminhar humano geraram respostas dinâmicas significativas no piso analisado. Portanto não se deve subestimar a resposta de frequências naturais de até 20 Hz no que diz respeito ao conforto humano. Ainda foi observado que existem fortes indícios de que outros harmônicos devido ao caminhar humano devam ser considerados além dos propostos nas formulações correntes.

De acordo com Mendes e Oliveira (2008), a análise do comportamento dinâmico de estruturas deve ser efetuada recorrendo tanto a modelos numéricos computacionais quanto a resultados experimentais obtidos em ensaios de vibrações. Ainda de acordo com os autores, normalmente a utilização de modelos numéricos está associada à concepção e projeto de novas estruturas ou então associada às atividades relacionadas com o acompanhamento e/ou a avaliação de segurança de estruturas existentes que apresentem um significativo risco potencial.

Brito e Pimentel (2009) afirmam que o significado das frequências naturais para o projeto está relacionado com a possibilidade de uma potencial ressonância da estrutura devido à excitação produzida pela atividade humana. A intensidade e as características das cargas aplicadas variam de acordo com o comportamento dos espectadores e, em princípio, com o tipo de evento. Problemas de vibração são uma possibilidade, devido à sincronização dos movimentos, como por exemplo, em shows de música pop ou eventos esportivos.

Ainda de acordo com Brito e Pimentel (2009), os estudos estáticos assumem que as cargas sejam constantes ou aplicadas muito lentamente até atingirem o valor máximo. Devido a isso, consideram-se nulas a velocidade e a aceleração de cada partícula do modelo. Como resultado, os estudos estáticos ignoram as forças inerciais e de amortecimento. Com relação à análise dinâmica, a mesma se divide em linear, onde as propriedades do material são lineares, e não linear, que é utilizada quando não existe uma linearidade do material, além da não linearidade geométrica. Nesse tipo de análise, o carregamento dinâmico consiste em qualquer tipo de carregamento cuja magnitude e/ou posição varia no tempo. Devido ao fato de tanto o carregamento quanto a resposta da estrutura variarem no tempo, é evidente que o problema dinâmico não tem uma única solução, ao contrário do problema estático. Por esse motivo, é de interesse na análise de resultados, observar os valores de pico referentes ao deslocamento, velocidade ou aceleração no domínio do tempo.

Kasperski e Agu apud Stenpniewksi e Haag (2010) estudaram sobre problemas de vibrações induzidas por pessoas em estruturas e foi relatado que acelerações acima de 18% do valor da gravidade geram um grande desconforto aos seres humanos. E acelerações acima de 35% do valor da gravidade geram pânico, sendo este valor considerado como um limite do pânico.

Stenpniewski e Haag (2010) sugerem que estádios na Alemanha sejam monitorados durante shows musicais, para que se acelerações excessivas forem alcançadas, possam ser adotadas algumas medidas de segurança, como diminuição da animação do público e do volume do som, para diminuir os efeitos das vibrações e garantir uma maior segurança das arquibancadas.

Da Silva (2011), em seu trabalho, ressalta que durante o estudo de vibrações em sistemas estruturais deve-se analisar a frequência natural de oscilação, os modos de vibração e o amortecimento. Frequência natural é a taxa de oscilação de uma estrutura na ausência de carregamento. Modo de vibração é a forma como a estrutura vibra em determinada frequência natural e amortecimento, que também está relacionado com as vibrações em estruturas, representa a dissipação da energia que ocorre no processo.

Silva (2012) estudou o comportamento das arquibancadas do Estádio José Alvalade, localizado em Portugal, analisando as respostas dinâmicas da estrutura, simulando diversos casos de carregamento da torcida se movimentando de maneira sincronizada. Os resultados obtidos foram comparados com os critérios de conforto definidos em normas e guias de projeto.

Lima (2013) estudou o comportamento das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília, localizado em Brasília, através do método dos elementos finitos. Uma análise modal da estrutura foi realizada, além de uma análise transiente, submetendo a estrutura a diferentes carregamentos dinâmicos, simulando a ação das torcidas sobre as arquibancadas. Na maior parte das situações que foram analisadas, as respostas se mostraram aceitáveis, porém, em cerca de 25% das situações, as acelerações ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas, indicando situações de desconforto para o público.

Lima (2013) também realizou uma análise de vídeos de cantos de torcida (acompanhados por saltos) dos clubes mais populares do Brasil, da Argentina e do México. A Tabela 1 apresenta os resultados dessa análise, contendo os valores das

frequências de salto das torcidas em alguns dos cantos mais populares das referidas torcidas. Analisando os resultados apresentados na Tabela 1, notou-se que os cantos das torcidas de Flamengo e Corinthians são acompanhados por saltos que ocorrem nas frequências de 2,4Hz; 2,5Hz e 2,7Hz. Nas torcidas de clubes da Argentina (Boca Juniors) e do México (Chivas e Pumas), percebe-se que também existem cantos com frequências mais baixas, como 1,70Hz; 1,80Hz e 1,90Hz.

Tabela 1 - Frequências características de cantos acompanhados de saltos de torcidas de futebol (LIMA, 2013)

Time	Canto	Frequência (Hz)
Flamengo	"Festa na favela"	2,70
	"Sai do chão"	2,40
	"Dá-lhe ô"	2,70
Corinthians	"Hino Corinthians"	2,50
	"Aqui tem um bando de loucos"	2,40
	"Não para"	2,70
Boca Juniors - Argentina	"Boca mi buen amigo"	2,40
	"Y dale boca"	2,40
	"Vamos xeneizes"	1,90
Chivas - México	"Chivas de mi vida"	1,70
	"Te alentaré de corazón"	1,80
Pumas - México	"OleleOlala"	2,40

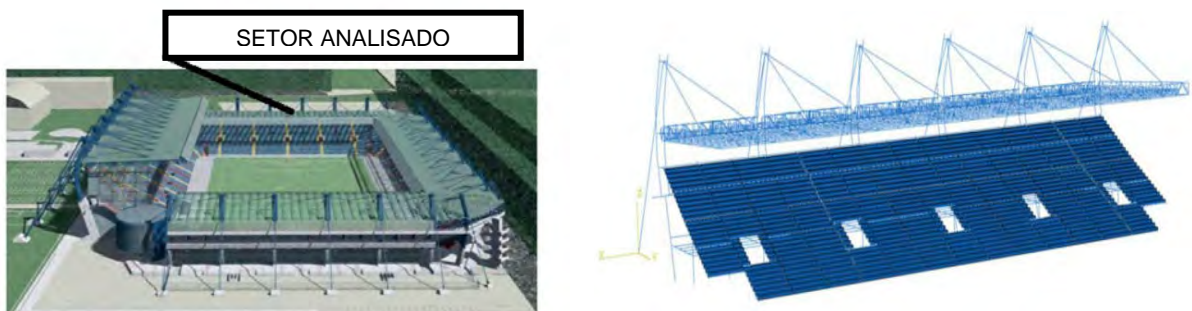
Comer, Blakeborough e Williams (2013) investigaram os efeitos de um público balançando sobre uma arquibancada fixa construída em um laboratório. A estrutura foi avaliada em duas situações diferentes, uma com suporte flexível, apresentando frequência fundamental de 2,8Hz e a outra com suporte rígido, possuindo frequência fundamental de 23Hz. Com relação ao primeiro e ao terceiro harmônicos da força não houve diferença entre as duas situações estudadas. Em contrapartida, ocorreu uma redução na magnitude do segundo harmônico na situação com suporte flexível.

Chen, Zhang e Liu (2015), ao avaliarem o saguão de espera de uma estação ferroviária, obtiveram como frequência fundamental da estrutura o valor



de 2,20Hz, que se situa abaixo do limite recomendado por normas e guias de projeto. Ao longo do estudo, foram obtidos os sinais de aceleração em ensaios com um grupo de pessoas caminhando e saltando, além dos sinais sem ensaios controlados, ou seja, que foram auferidos durante o fluxo diário de pessoas no saguão. Passados três anos da inauguração da estação, os autores relataram que não havia queixas dos usuários com relação ao conforto humano.

Tatara e Ptasznik (2015) realizaram a avaliação de uma arquibancada de um estádio localizado em Cracóvia (Figura 1a), onde o carregamento dinâmico humano foi considerado para refletir o comportamento real da torcida. A avaliação foi realizada através de uma modelagem numérico-computacional (Figura 1b). De acordo com os autores, para carregamentos individuais deve ser considerada a faixa de frequência de 1,50Hz a 3,50Hz, enquanto para grupos maiores a faixa de frequência de 1,50Hz a 2,80Hz deve ser considerada. Os autores simularam o carregamento humano com duas diferentes frequências, a primeira frequência considerada foi de 2,20Hz e a segunda foi de 1,90Hz. Conclui-se que a segunda frequência natural da estrutura ( $f_2=4,50\text{Hz}$ ) é quase duas vezes maior do que a frequência de excitação gerada pela dança chamada "Labado" ( $f=2,20\text{Hz}$ ), o que resultou no aumento do nível de vibrações dos elementos da estrutura. Os autores também verificaram que o carregamento dinâmico gerou um aumento na faixa de 40 a 60% no valor da tensão do sistema estrutural, além de um aumento nos valores de deslocamento encontrados. Os autores também concluíram que, a medida que a frequência relacionada ao carregamento humano diminui, maiores são os valores de força transmitidos para a estrutura, aumentando assim os efeitos dinâmicos sobre o sistema estrutural.



a) Vista da arquibancada

b) Modelo numérico da arquibancada

Figura 1 - Estádio localizado em Cracóvia (TATARA; PTASZNIK, 2015)

Na avaliação de um piso de concreto protendido realizada por Zhou et al. (2016), foram obtidas as frequências e os modos experimentais através de ensaios realizados com o impacto do calcanhar. O valor encontrado para a frequência fundamental da estrutura foi de 6,17Hz, que se situa abaixo do limite recomendado por normas e guias de projeto. Posteriormente, atividades humanas rítmicas foram realizadas sobre este piso e verificou-se, de acordo com a percepção das pessoas que praticavam tais atividades, que os níveis de vibração eram aceitáveis. Devido aos resultados, os autores frisaram que alguns limites recomendados por normas e guias de projeto podem ser conservadores para este piso.

An et al. (2016) estudaram o comportamento de um piso misto suportado por cabos, conforme Figura 2. Verificou-se que o piso apresentava frequências naturais que variavam de 2,30Hz a 3,06Hz, além de possuir um baixo fator de amortecimento, igual a 1,54%. Foi relatado pelos autores que os participantes dos ensaios sentiram um grande desconforto quando as acelerações de pico estavam acima de  $1,2\text{m/s}^2$ .



a) Piso misto suportado por cabos



b) Pessoas pulando

Figura 2 - Piso misto suportado por cabos sob atividades humanas (AN et al., 2016)

Erlina, Priyosulistyo e Saputra (2017) avaliaram um auditório com piso de concreto protendido, uma vez que, durante um concerto musical, foram relatadas diversas queixas relacionadas à vibração excessiva da estrutura. Ensaios experimentais foram realizados, onde para a frequência fundamental foi encontrado o valor de 4,39Hz, que se situa na mesma região dos harmônicos de atividades humanas rítmicas. Com o objetivo de aumentar o conforto humano, os autores instalaram um amortecedor viscoso na estrutura, que é um sistema

passivo de atenuação de vibração, resultando no aumento do amortecimento do piso de 4,58% para 14,51%.

Plachy, Polachy e Verner (2017) realizaram uma série de experimentos nas arquibancadas do estádio Eden, em Praga, tendo como objetivo a avaliação do comportamento dos espectadores e das vibrações causadas durante alguns jogos de futebol (ver Figura 3). As vibrações das arquibancadas foram medidas simultaneamente em três diferentes pontos na superfície inferior da estrutura da arquibancada. As maiores vibrações encontradas foram quando os espectadores estavam praticando a atividade denominada saltos de 2º e 3º tipo, que é caracterizada por, em linhas separadas, os espectadores se juntarem com os braços em volta dos ombros e começarem a pular de forma síncrona no local na direção vertical ou quando os espectadores unidos se movem horizontalmente por salto sincronizado da esquerda para a direita. Nestes tipos de saltos, todos os ocupantes do setor estudado estavam envolvidos ativamente e em alto grau de sincronização. A frequência fundamental do salto dos espectadores encontrada pelos autores foi de cerca de 2,1Hz. Os autores também concluíram que este tipo de salto pode induzir a vibração de ressonância em uma frequência natural de arquibancada superior a 6Hz.



a) Vista geral da parte da arquibancada estudada



b) Torcida ocupando a parte da arquibancada estudada

Figura 3 - Vistas da arquibancada do estádio Eden, em Praga (PLACHY; POLAK; VERNER, 2017)

## 1.2 Caracterização dinâmica de atividades humanas rítmicas

Descrever um carregamento produzido por pessoas em movimento envolve características próprias de cada indivíduo como a idade, o peso, a habilidade física, o tipo de calçado e a forma como cada indivíduo realiza a atividade.

As atividades realizadas por plateias em shows e torcidas envolvem a perda de contato com a estrutura, assim durante um determinado período, o indivíduo está em contato com a estrutura e por alguns instantes o indivíduo se mantém no ar. Essas atividades são caracterizadas pela execução de saltos e principalmente pelo grau de sincronismo em que atuam os participantes.

A ação de saltar consiste na projeção da massa do corpo para cima e para frente, assim fazendo com que percorra certo período de tempo suspenso no espaço. Existem dois tipos de saltos: o salto vertical, onde o corpo é animado de uma velocidade dirigida apenas para cima, e o salto oblíquo, onde se tem uma velocidade vertical dirigida para cima, outra horizontal dirigida para frente. Os saltos podem ocorrer seguidos de movimentos horizontais, e podem ser executados, estando o indivíduo inicialmente parado ou em movimento. O salto é dividido em quatro fases de execução, que podem ser observadas na Figura 4.

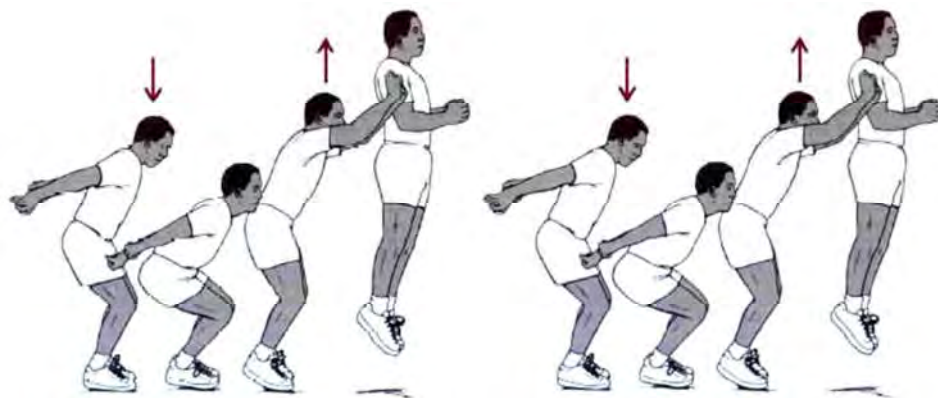


Figura 4 - Movimentos de um indivíduo durante um salto (FAISCA, 2003)

A primeira fase é a fase de preparação, onde o indivíduo se encontra na posição inicial, em contato com o solo. A segunda fase é a impulsão, onde o indivíduo primeiramente flexiona os joelhos, além de se elevar os membros superiores, para se projetar para frente e para cima e após ocorre a extensão dos membros inferiores, elevando assim os centros de gravidade do corpo. A terceira

fase é a fase de suspensão, onde o corpo perde o contato com o solo e segue uma trajetória no espaço. E por último tem a quarta fase, que é a fase da aterrissagem, quando o corpo volta a ter contato com o solo, ocorrendo novamente uma flexão dos joelhos para depois retornar à posição inicial para se iniciar um novo salto.

Através da Figura 5, que mostra a força aplicada em uma estrutura durante a execução de um salto, percebe-se que, quando o indivíduo está no ar, a força aplicada sobre a estrutura vale zero. A medida em que o indivíduo aterrissa, a força cresce até atingir seu pico e, a partir desse instante, o indivíduo começa a impulsionar para a realização do próximo salto.

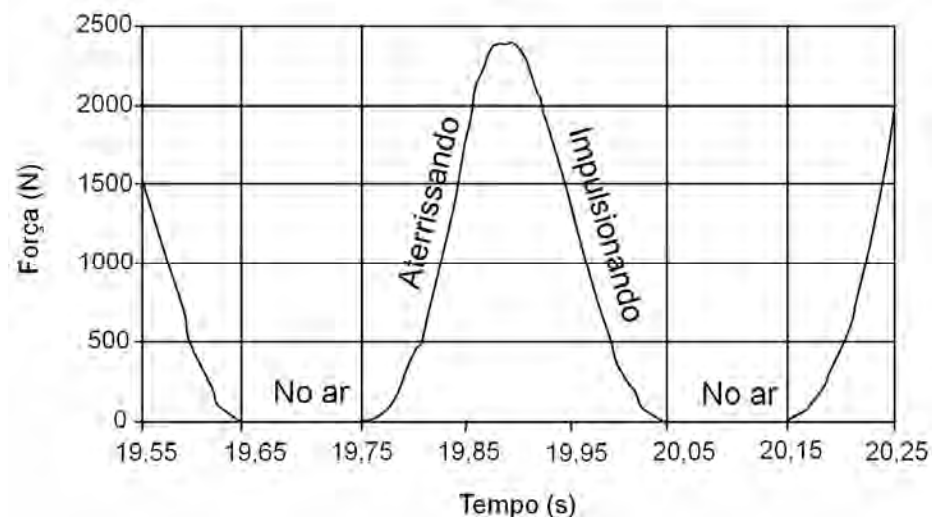


Figura 5 - Força aplicada em uma estrutura durante um salto (FAISCA, 2003)

Existe um subtipo de salto denominado “saltos rítmicos”, que é baseado em movimentos consecutivos e sincronizado por estímulos sonoros. Este tipo de salto produz uma resposta de vibração maior comparada àquela induzida por um único salto (EBRAHIMPOUR; SACK, 1989; TUAN; SAUL, 1985), além de representar um comportamento comum da multidão. O salto rítmico ocorre mais frequentemente na presença de música ou eventos, como por exemplo, em partidas de futebol, em que as multidões são incentivadas a movimentar-se, batendo palmas ou dançando. A música pode motivar os indivíduos a pularem e, através de sua batida, estimula um ritmo de salto específico, o que pode gerar carregamentos dinâmicos com potencial para vibrações estruturais de grande magnitude (LITTLER, 2002; PARKHOUSE; EWINS, 2006). A Figura 6 ilustra o movimento dos saltos rítmicos, enquanto a Figura

7 apresenta gráficos da força no domínio do tempo, que mostram a variação de forma à medida que a frequência dos saltos é aumentada.

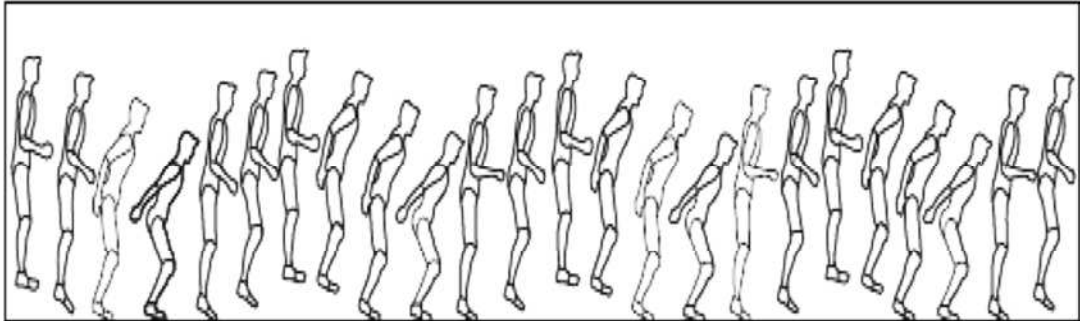


Figura 6 - Saltos rítmicos [Adaptado de Meghdari e Aryanpour, 2003]

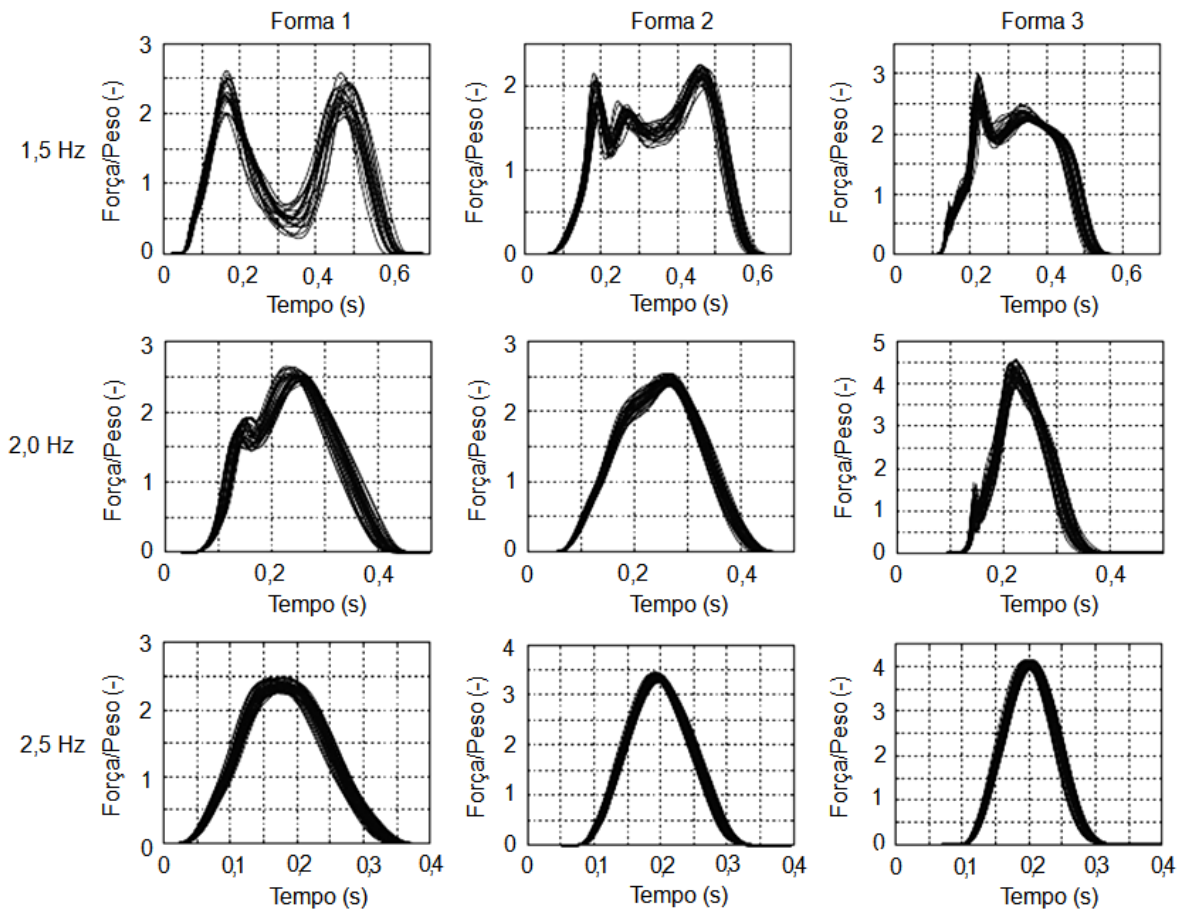


Figura 7 - Variação das frequências dos saltos [Adaptado de Racic e Pavic, 2010a]

Verifica-se, a partir da avaliação da Figura 7, que saltos de baixa frequência representam movimentos lentos, predominantemente realizados sem contato com a estrutura e, conseqüentemente, fica rapidamente em repouso entre os saltos. Como

consequência deste comportamento, observa-se o surgimento de dois picos e um "intervalo estacionário", onde o indivíduo realiza uma pausa entre os movimentos (NHLEKO et al., 2008; RACIC; PAVIC, 2010a; SIM et al., 2005). Continuando na análise dos gráficos presentes na Figura 7, ao se comparar os resultados obtidos pelos diferentes indivíduos, verifica-se que as formas apresentam uma tendência similar. Entretanto, diferenças foram observadas em frequências mais baixas. A variação entre indivíduos é menor para saltos rítmicos do que em saltos simples. A sincronização do movimento através de "batidas" resulta em saltos mais uniformes entre os indivíduos (PARKHOUSE; EWINS, 2004).

### 1.2.1 Modelos de carga estática equivalente

O carregamento dinâmico proveniente de atividades humanas durante muito tempo foi simulado como uma carga estática equivalente e, nos tempos atuais, essa consideração ainda é comumente utilizada na prática corrente de projeto. A Tabela 2 apresenta alguns valores de carga estática equivalente segundo o autor, tipo de atividade, frequência da atividade e número de participantes.

Tabela 2 - Carga estática equivalente de carregamentos dinâmicos de acordo com alguns autores (JONES; REYNOLDS; PAVIC, 2011; MCDONALD, 2015)

Autor	Jones et al., 2011	Tuan e Saul, 1985	Ebrahimpour et al., 1986	Moreland, 1905	Tilden, 1913
Tipo de atividade	Pessoa estática	Saltos rítmicos	Saltos periódicos	Saltos	Pessoas balançando (jouncing)
Frequência	Não disponível	2,20Hz	3,00Hz	Desconhecido	Não disponível
Participantes	1	1	1	90	1
Carregamento observado	0,75 kN/pessoa	4,50kN/m <sup>2</sup>	2,85 kN/pessoa	1,13 kN/pessoa	2,04 kN/pessoa
Carga estática equivalente	2,15kN/m <sup>2</sup>	4,50kN/m <sup>2</sup>	8,14kN/m <sup>2</sup>	3,23kN/m <sup>2</sup>	5,83kN/m <sup>2</sup>

Valores semelhantes (sem coeficiente de ponderação) aos encontrados na Tabela 2 são considerados no Eurocódigo1 (EN-1991-1-1, 2002), que trata das ações sobre as estruturas, para as categorias C4 (áreas de ginásio e de dança) e C5

(áreas susceptíveis a multidões, tais como em grandes eventos), de 4,5 a 5,0 kN/m<sup>2</sup> e 5,0 a 7,5 kN/m<sup>2</sup>, respectivamente. A norma brasileira NBR 6120 (1980) considera um valor mínimo de 5,0kN/m<sup>2</sup> para salão de danças e esportes. Segundo Ellis e Ji (2004b), do Guia de projeto BRE Digest 426, o valor de 5kN/m<sup>2</sup> para multidões é usual na prática de projeto, que equivale ao peso estático de 6,25 pessoas/m<sup>2</sup>.

### 1.2.2 Modelos periódicos

Os modelos periódicos, por serem recomendados por normas e guias de projeto, como por exemplo, a norma internacional ISO10137 (2007), o guia americano American Institute of Steel Construction - AISC (2016) e o guia europeu The Steel Construction Institute - SCI (2009), são os mais utilizados atualmente. Tais modelos consideram nas suas formulações que o período da atividade (T), o período de contato com o solo durante a atividade (T<sub>c</sub>) e o coeficiente de impacto (K<sub>p</sub>), são constantes ao longo do tempo.

A caracterização da ação dinâmica tem sido realizada por diversos autores (BACHMANN et al., 1995; ELLIS; JI, 2004a; ISO 10137, 2007; MURRAY et al., 2016; SMITH, A. L.; HICKS, S. J.; DEVINE, 2009) através da utilização de funções matemáticas que representem a atividade humana rítmica, por meio de uma série de Fourier, tendo como base a realização de ensaios experimentais, sendo a função semisseno comumente utilizada por estes autores.

O estudo de Bachmann e Ammann (1987) é um dos primeiros trabalhos a propor uma função matemática para representar o carregamento proveniente da atividade humana rítmica. Os autores consideram que a função semisseno define bem o carregamento com perda de contato, de acordo com a equação (1).

$$\begin{aligned}
 F(t) &= K_p G \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{T_c} t\right) && \text{Para } t \leq T_c \\
 F(t) &= 0 && \text{Para } T_c \leq t \leq T
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde F(t): força produzida pelo indivíduo (N); K<sub>p</sub>: coeficiente de impacto; G: peso do indivíduo (N); T<sub>c</sub>: período de contato da atividade em (s); t: tempo em (s).



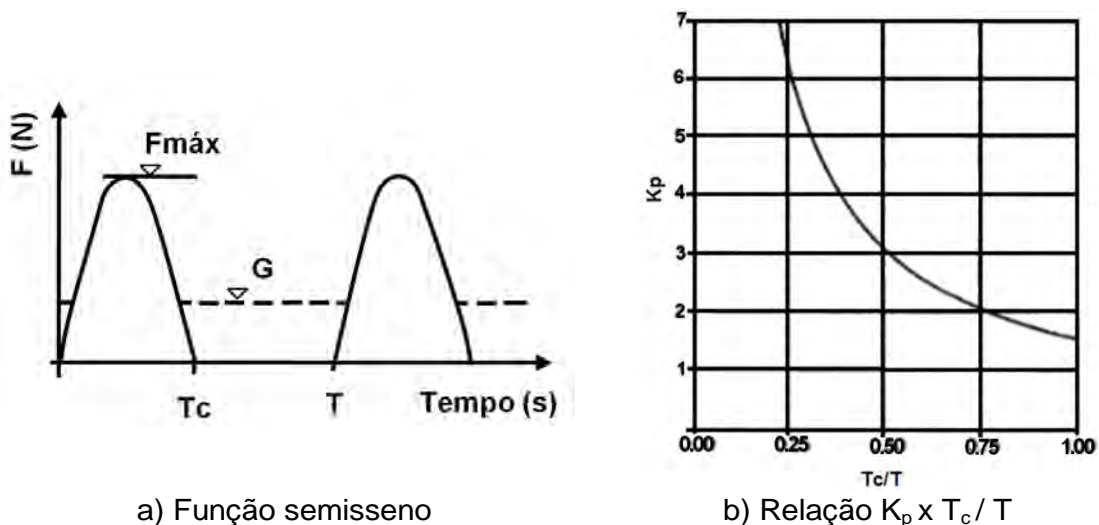
De acordo com a equação (2), o peso estático de um indivíduo deve ser igual a integral de um pulso em relação ao tempo, com largura igual ao período de contato ( $T_c$ ) (BACHMANN; AMMANN, 1987).

$$\frac{1}{T} \int_0^{T_c} K_p G \sin\left(\frac{\pi}{T_c} t\right) dt = G \quad (2)$$

A resolução da equação (2) é exibida na equação (3), onde pode-se observar uma relação entre o coeficiente de impacto ( $K_p$ ) e a razão de contato ( $\alpha$ ) entre  $T_c/T$ .

$$K_p = \frac{\pi}{2 \frac{T_c}{T}} = \frac{\pi}{2\alpha} \quad (3)$$

A Figura 8 apresenta o modelo de carregamento proposto por Bachmann e Ammann (1987). Neste modelo, quanto menor o valor da razão de contato ( $\alpha$ ) entre  $T_c/T$ , maior é o valor do coeficiente de impacto ( $K_p$ ), conforme pode ser observado na Figura 8b. De acordo com os autores, um período de contato ( $T_c$ ) menor do que 0,15s dificilmente é alcançado devido a fisiologia humana. Ainda de acordo com os autores, os valores mais frequentes para a razão de contato encontram-se na faixa de 0,25 a 0,60.



a) Função semisseno  
b) Relação  $K_p \times T_c / T$   
Figura 8 - Modelo de carregamento proposto por Bachmann e Ammann (1987)  
[Adaptado de Bachmann e Ammann (1987)]

Outras funções matemáticas vêm sendo utilizadas para a representação da caracterização dinâmica das atividades humanas rítmicas. A função gaussiana e a função cosseno ao quadrado ( $\cos^2$ ), que também é conhecida como função Hanning (ARRILLAGA; WATSON, 2003), são exemplos de funções utilizadas para este fim. De acordo com Caetano, Cunha e Moutinho, 2011; Faisca, 2003; Sim et al., 2008, a função Hanning tem se mostrado capaz de ter um melhor ajuste à forma do sinal experimental produzido por saltos rítmicos, principalmente no que diz respeito ao período de contato ( $T_c$ ).

Faisca (2003), tomando como base a realização de ensaios experimentais e utilizando a função Hanning, apresentou um modelo analítico-probabilístico para descrever matematicamente o carregamento dinâmico proveniente de atividades humanas rítmicas. Os ensaios foram realizados em grupos com uma, duas, seis, dez, dezesseis e vinte pessoas expostas à estímulos sonoros e visuais, onde sete diferentes tipos de atividades foram analisados (saltos à vontade; saltos em 1,5Hz; 2,0Hz; 2,5Hz; 3,0Hz; ginástica aeróbica; e simulações de eventos como shows musicais e torcidas de futebol). A representação matemática deste tipo de carregamento dinâmico, que é realizada por meio da função Hanning, é expressa pela equação (4).

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[ 0,5 - 0,5 \cos \left( \frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\} \quad \text{Para } t \leq T_c$$

$$F(t) = 0 \quad \text{Para } T_c \leq t \leq T$$
(4)

Onde  $F(t)$ : representação matemática do carregamento no tempo em (N);  $CD$ : coeficiente de defasagem;  $K_p$ : coeficiente de impacto;  $P$ : peso da pessoa em (N);  $T$ : período da atividade em (s);  $T_c$ : período de contato da atividade em (s);  $t$ : tempo em (s).

A Figura 9 facilita o entendimento da função matemática utilizada, uma vez que ilustra os dois intervalos de tempo significativos da referida função. Ressalta-se que a força dinâmica normalizada (FDN) é representada na ordenada da referida figura.

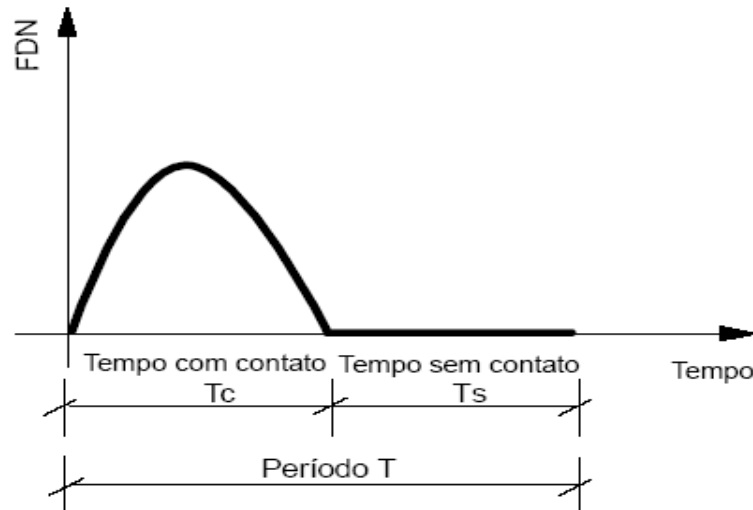


Figura 9 - Representação genérica da função de carregamento dinâmico (ALVES, 1997)

Destaca-se que o coeficiente de impacto ( $K_p$ ), é um coeficiente de majoração da carga, que considera o impacto do salto sobre a estrutura. Enquanto que o parâmetro CD é um coeficiente de ponderação das ações dinâmicas definidas em função da atividade realizada e do número de pessoas que atuam sobre a estrutura. Este coeficiente leva em conta os efeitos de multidão, ou seja, o grau de sincronismo entre as pessoas que atuam sobre a estrutura. Deste modo, a definição deste parâmetro considera possíveis defasagens e variações de ritmo que levariam a redução da intensidade do carregamento.

A Figura 10 representa o gráfico do parâmetro CD (coeficiente de defasagem) para três atividades estudadas por Faisca (2003) extrapoladas para um grande número de pessoas. Isso permite que as cargas possam ser usadas para representar multidões. Percebe-se através dessa figura que o coeficiente de defasagem não varia muito para a atividade aeróbica como varia para as atividades de saltos à vontade e de show/torcida, à medida que o número de pessoas é aumentado. Isso ocorre porque há um maior sincronismo na atividade aeróbica, cujo CD fica entre os valores de 0,9 a 1,0. Durante a atividade de saltos à vontade os valores de CD estão aproximadamente entre 0,56 e 1,0. Enquanto que na atividade de show/torcida, os valores de CD se encontram entre 0,70 e 1,0.

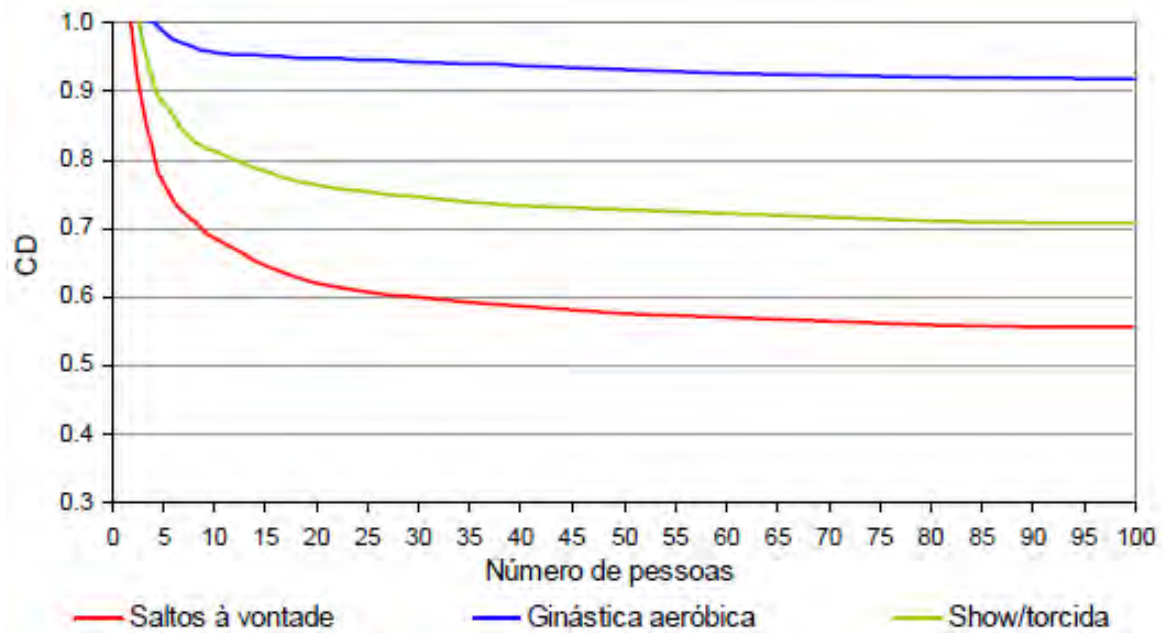


Figura 10 - Coeficientes de defasagem para as atividades (FAISCA, 2003)

A Tabela 3 apresenta os valores dos demais parâmetros obtidos experimentalmente por Faisca (2003) para representar a atividade de salto à vontade, ginástica aeróbica e show/torcida.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados na função de carregamento (FAISCA, 2003)

Atividades	T (s)	T <sub>c</sub> (s)	K <sub>p</sub>
Saltos à vontade	0,44 ± 0,15	0,32 ± 0,09	3,17 ± 0,58
Ginástica aeróbica	0,44 ± 0,09	0,34 ± 0,09	2,78 ± 0,60
Show/Torcida	0,37 ± 0,03	0,33 ± 0,09	2,41 ± 0,51

Sim (2006) em seu trabalho, para que pudesse definir estatisticamente o tempo de impulso, a forma da função e o grau de sincronização entre as pessoas, realizou uma avaliação experimental de duas situações distintas: a primeira onde duas pessoas saltaram separadamente e a segunda as mesmas duas pessoas saltaram simultaneamente. O autor optou por utilizar a função Hanning, uma vez que a mesma melhor se ajustou analiticamente aos valores experimentais obtidos para saltos na faixa de frequência de 2,0 a 3,5Hz.

O guia técnico intitulado “Design of Floors for Vibration: A New Approach” (SCI, 2009), que foi publicado pelo SCI (The Steel Construction Institute), apresenta o modelo de carregamento proposto por Ellis e Ji (2004a), que foi desenvolvido levando em consideração a carga de multidão existente em estruturas durante a prática de atividades humanas rítmicas. Segundo Ellis e Ji (2004a), para a definição dessa carga de multidão, alguns fatores devem ser levados em consideração, entre eles, a densidade da multidão, a área ocupada pela multidão, a faixa de frequência da atividade rítmica praticada, o efeito dinâmico da multidão e a interação homem-estrutura. A determinação da função matemática representativa do carregamento produzido por atividades humanas rítmicas foi realizada através da elaboração de testes experimentais com diferentes grupos compostos por até sessenta e quatro pessoas. Os valores dos coeficientes de Fourier também foram determinados experimentalmente. A representação matemática do carregamento está expressa na equação (5).

$$F(t) = G \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_{n,v} \text{sen}(2n\pi f_p t + \phi_n) \right\} \quad (5)$$

Onde  $F(t)$ : representação matemática do carregamento no tempo (N);  $G$ : peso de uma pessoa (N);  $r_{n,v}$ : coeficiente de Fourier induzido por  $v$  pessoas;  $n$ : número de termos de Fourier;  $v$ : número de pessoas;  $\phi_n$ : diferença de fase;  $f_p$ : frequência do carregamento;  $t$ : tempo (s).

A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros (coeficiente de Fourier e diferença de fase) que variam de acordo com o valor do  $\alpha$ , que representa a relação entre o período de contato e o período do carregamento, que depende do tipo de atividade praticada.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados na função de carregamento (ELLIS; JI, 2004a)

$\alpha$	Tipo de atividade	Parâmetros	N					
			1	2	3	4	5	6
2/3	Baixo impacto	$r_n$	9/7	9/55	2/15	9/247	9/391	2/63
		$\phi_n$	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$
1/2	Alto impacto	$r_n$	$\pi/2$	2/3	0	2/15	0	2/35
		$\phi_n$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
1/3	Saltos normais	$r_n$	9/5	9/7	2/3	9/55	9/91	2/15
		$\phi_n$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$\pi/2$	$-5\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$

Neste modelo é necessário considerar a distribuição espacial das pessoas. Existe uma variação nos valores dos coeficientes de Fourier, em função dos diferentes estilos de salto e coordenação das pessoas. Apenas os três primeiros coeficientes de Fourier foram determinados, sendo que estes coeficientes dependem do número de pessoas ( $v$ ) que praticam a atividade rítmica. As equações (6), (7) e (8) expressam o cálculo destes coeficientes.

$$r_{1,v} = 1,61v^{-0,082} \quad (6)$$

$$r_{2,v} = 0,94v^{-0,24} \quad (7)$$

$$r_{3,v} = 0,44v^{-0,31} \quad (8)$$

À medida que se aumenta o número de pessoas praticando a atividade humana rítmica, os valores dos coeficientes de Fourier são reduzidos, porém continuam sendo reconhecidos como valores que geram carregamentos significativos. Os testes experimentais foram realizados com grupos de até 64 pessoas, devido à preocupação com a segurança relacionada aos pisos utilizados nos ensaios, porém o desenvolvimento do modelo de carregamento permite avaliações para grupos maiores. Para grupos de até 8.192 pessoas foram utilizados valores combinados de todas as variações e foram selecionados grupos com tamanhos que podiam ser potências de 2.

Conforme dito anteriormente, os valores dos coeficientes de Fourier são reduzidos à medida que o número de pessoas praticando a atividade rítmica aumenta. Essa afirmação se torna mais clara quando são analisados os valores para grupos de até 8.192 pessoas. Pode ser visto também que, a partir de um determinado número de pessoas, os coeficientes de Fourier não reduzem mais com o aumento da quantidade de pessoas, e, sim, passam a atingir valores constantes, conforme pode ser verificado na Figura 11.

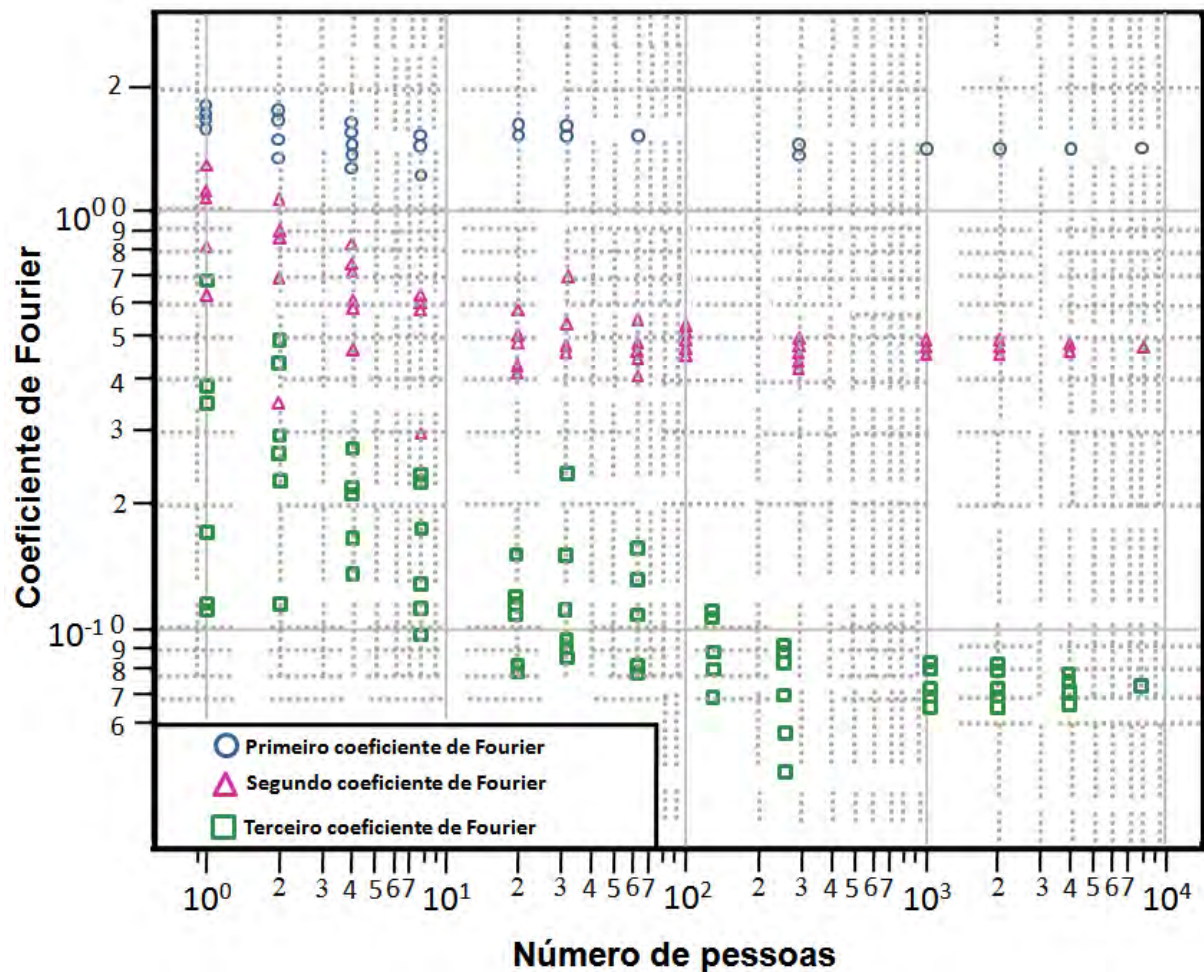


Figura 11 - Valores dos coeficientes de Fourier para grupos de até 8.192 pessoas [Adaptado de Ellis e Ji, 2004a]

É importante perceber que, para o cálculo do carregamento, ao se considerar um grande número de pessoas, outros fatores que não estavam incluídos podem se tornar importantes. Um exemplo descrito por Ellis e Ji (2004a) é que, para um grande grupo, pode haver um atraso de tempo entre as pessoas que estão mais

próximas dos alto-falantes em um musical e as pessoas que estão mais longe e isso tem sido observado em arquibancadas.

É possível quantificar os efeitos da alteração do desvio padrão para a variação de fase. Ellis e Ji (2004a) repetiram os cálculos para grupos de até 8.192 pessoas, com três valores diferentes da variação de fase ( $0,18\pi$ ,  $0,12\pi$  e  $0$ ). Na Tabela 5 são apresentados estes resultados.

Tabela 5 - Valores dos coeficientes de Fourier para grupos de até 8.192 pessoas (ELLIS; JI, 2004a)

Diferença de fase	Coeficientes de Fourier					
	1	2	3	4	5	6
$0,18\pi$	1,40	0,469	0,072	0,0070	0,0024	0,0018
$0,12\pi$	1,52	0,655	0,157	0,0281	0,0073	0,0019
0	1,62	0,852	0,283	0,0831	0,0434	0,0245

Racic e Pavic (2010b), baseados em um ajuste de uma função gaussiana, propuseram um modelo matemático de geração de cargas verticais sintéticas para representar uma pessoa pulando. De acordo com os autores, o modelo proposto representa o carregamento de forma mais realista quando comparado ao modelo convencional da função semisseno.

Através de um estudo experimental e numérico, Caetano, Cunha e Moutinho (2011) caracterizaram as cargas dinâmicas verticais produzidas por pessoas saltando em uma passarela de forma a levar a estrutura à condição de ressonância. Os autores constataram que, apesar do sinal da força dinâmica gerado por uma pessoa ter se mostrado de acordo com a função semisseno, a função Hanning se correlacionou de maneira mais acurada com os dados obtidos nos ensaios experimentais.

Racic, Pavic e Brownjohn (2013) avaliaram que as investigações realizadas por muitas vezes se limitam a testes em laboratório, o que pode gerar resultados que não condizem necessariamente com a realidade. Os autores sugerem que, além dos equipamentos comumente empregados na literatura, sejam utilizados equipamentos que se baseiam no rastreamento do movimento do corpo humano através de



câmeras de vídeo especializadas, de modo que as situações de carregamento sejam representadas da forma mais realista possível.

Cappellini (2015) afirma que considerar o carregamento dinâmico humano como uma força dinâmica externa sobre as estruturas é uma hipótese elementar, que não reproduz a realidade do comportamento ser humano-estrutura. De acordo com o autor, esta consideração, além de não considerar o amortecimento individual inerente do ser humano, tende a superestimar as vibrações encontradas na fase de projeto, o que pode gerar um custo desnecessário aos mesmos.

Gaspar e Silva (2015) realizaram um estudo paramétrico para investigar numericamente o nível de vibrações de um piso misto (aço-concreto) quando submetido a atividades humanas rítmicas. A resposta dinâmica do piso em ressonância foi comparada em função da simulação de diversas funções matemáticas recomendadas por normas e guias de projeto. Observou-se que as referidas funções podem ser mais ou menos conservadoras dependendo de seus coeficientes dinâmicos assim como da consideração da falta de coordenação entre as pessoas.

Campista (2015) realizou a avaliação das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha através da utilização de dois modelos de carregamento distintos: o primeiro foi o proposto por Faisca (2003) e o segundo foi o desenvolvido por Ellis e Ji (2004a). Cinco diferentes situações de carregamento foram investigadas (100% de ocupação sobre as arquibancadas; somente arquibancada superior cheia; 75% de ocupação sobre as arquibancadas; 50% de ocupação sobre as arquibancadas; e 25% de ocupação sobre as arquibancadas). Verificou-se que, quando utilizado o modelo de carregamento proposto por Faisca (2003), nenhum valor de aceleração encontrado ultrapassou os limites estabelecidos por normas e recomendações de projeto, enquanto quando se utilizou o modelo de carregamento desenvolvido por Ellis e Ji (2004a), alguns valores de aceleração encontrados nas quatro primeiras situações de carregamento ultrapassaram os limites estabelecidos por normas e recomendações de projeto.

Ainda de acordo com o estudo realizado por Campista (2015), ao se comparar os resultados encontrados para as acelerações com base no emprego dos dois modelos de carregamento dinâmico utilizados, em todas as situações de carregamento estudadas, os valores obtidos no modelo de carregamento proposto

por Ellis e Ji (2004a) sempre foram superiores aos valores obtidos utilizando o modelo de carregamento proposto por Faisca (2003). Tal fato pode ser explicado em função de que os parâmetros utilizados no modelo proposto por Ellis e Ji (2004a) para a definição dos harmônicos da excitação possuem uma transferência de energia (amplitudes) na resposta dinâmica do sistema superior à apresentada no modelo de carregamento proposto por Faisca (2003).

Em seu trabalho, Martínez et al. (2016), com o objetivo de simular matematicamente a atividade de saltos, divulgaram um novo modelo de carregamento. A partir da utilização de uma plataforma de força e tomando como base a realização de mais de cem testes experimentais (Figura 12), os autores criaram uma força randômica baseada nas distribuições estatísticas dos parâmetros de ângulo de fase, força e frequência. De acordo com os autores, para um ginásio real, com uma estrutura flexível e com frequência fundamental de 5,74Hz, foi alcançada uma validação experimental e calibração numérica da função proposta satisfatória.



Figura 12 - Pessoas pulando sobre uma plataforma de força (MARTÍNEZ et al., 2016)

Maca e Rokos (2017) consideraram em seu estudo modelos de carga estática equivalente, modelos com aproximações simples no domínio do tempo e da frequência, além de modelos baseados na geração de Monte Carlo e de modelos probabilísticos para a caracterização da carga dinâmica produzida pelas pessoas em estruturas de arquibancada. Os autores apresentam a Tabela 6 que contém as faixas de frequências de carregamentos dinâmicos humanos que outros autores consideraram em seus respectivos trabalhos (BACHMANN; AMMANN, 1987; GINTY et al., 2001; ISO 10137, 2007; LITTLER et al., 2003).

Tabela 6 - Faixas de frequências para espectadores saltando (MACA; ROKOS, 2017)

	Ginty et al. (2001)	Little et al. (2003); ISO 10137 (2007)	Bachmann e Ammann (1987)
Individual	1,2Hz – 2,8Hz	1Hz – 3,5Hz	1,8Hz – 3,4Hz
Grupos pequenos	1,5Hz – 2,5Hz	1Hz – 3,5Hz	1,8Hz – 3,4Hz
Grupos grandes	1,8Hz – 2,3Hz	-	-

### 1.3 Interação dinâmica indivíduo-estrutura

A utilização de sistemas estruturais mistos (aço-concreto) para a prática de atividades humanas, como ginásios e estádios de futebol, consiste em um problema que possui um alto grau de complexidade. A reação humana diante de vibrações geradas por carregamentos oriundos de atividades humanas é um tema que vem sendo estudado por diversos autores ao longo dos anos. Quando um dos harmônicos da frequência do carregamento humano está próximo de uma das frequências naturais do sistema estrutural, podem ser produzidos níveis de vibrações excessivas, que podem causar desconforto humano, além de colocar em risco a segurança da estrutura (CAMPISTA, 2015; CAMPISTA; GASPARG; SILVA, 2015; GASPARG; SILVA, 2015).

Inicialmente, o corpo humano era considerado apenas como uma massa inerte sobre a estrutura. Esta consideração foi amplamente utilizada (ALLEN; RAINER, 1975; OHLSSON, 1982) e, sua aplicação nos estudos proporcionava a diminuição das frequências naturais dos sistemas estruturais. Neste sentido, diversos estudos realizados a partir do final da década de 1990 (BROWNJOHN, 1999; ELLIS; JI, 1997; REYNOLDS; PAVIC, 2006; SACHSE, 2002; SACHSE et al., 2003; 2004;) destacaram que as propriedades dinâmicas dos sistemas estruturais eram alteradas quando se comparava a estrutura vazia com a estrutura ocupada, em estudos de caso individuais.

Ohlsson (1982), em seu trabalho, afirma que pisos que possuem massa modal com mais de 1.000kg em todos os modos de vibração de interesse são classificados como pisos pesados. Além disso, o autor definiu os pisos pesados

como aqueles em que a presença do ser humano não modifica significativamente a frequência natural, a massa modal e o amortecimento modal.

Em seu trabalho, Ellis e Ji (1997) para explicarem o aparecimento de um novo modo de vibração, que foi observado nos ensaios experimentais realizados, afirmam que a multidão atua como um sistema massa-mola-amortecedor energizado. As diferenças nas propriedades dinâmicas foram atribuídas à interação dinâmica indivíduo-estrutura, onde as pessoas atuantes sobre a estrutura funcionam como um sistema dinâmico massa-mola-amortecedor.

Ellis e Ji (1997) realizaram um experimento na arquibancada do estádio de Twickenham, no Reino Unido, em duas situações distintas, a primeira com a arquibancada vazia e a segunda com cerca de 4.000 espectadores ocupando a arquibancada. Tal experimento evidenciou a interação dinâmica indivíduo-estrutura que ocorre. Analisando os gráficos presentes na Figura 13, verificou-se o aparecimento de uma nova frequência natural quando a arquibancada estava ocupada, assim como também foi verificado pelos autores um aumento significativo no valor do amortecimento quando a arquibancada se encontrava ocupada. Estes fenômenos indicaram que o corpo humano não atua como uma massa inerte, mas sim como um amortecedor de mola de massa adicional sobre a estrutura.

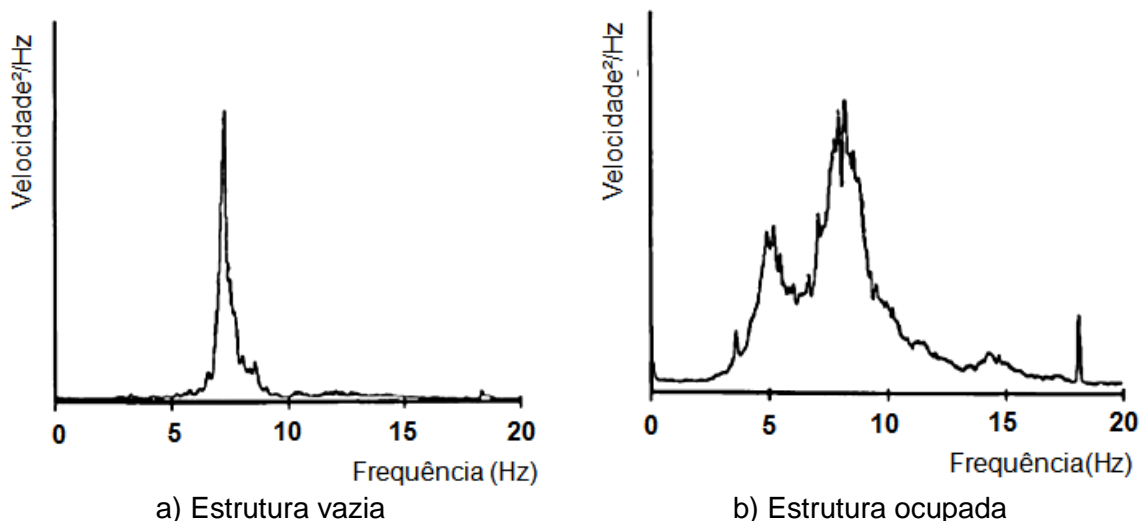


Figura 13 - Resposta dinâmica do estádio de Twickenham [Adaptado de Ellis e Ji, 1997]

Brownjohn (1999) realizou testes em laboratório, conforme pode ser visto na Figura 14, em uma estrutura de concreto pré-moldado com uma massa de 1200kg e frequência natural de 3,16Hz. O objetivo desse estudo foi avaliar das diferentes

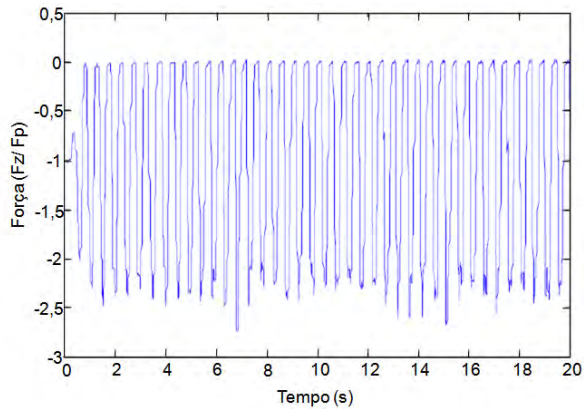
posturas do ser humano nas propriedades dinâmicas da estrutura. Os resultados indicaram que cada postura teve um efeito diferente na frequência natural da estrutura ocupada, sendo que todas as posturas resultaram em diminuição da frequência natural, além do aumento do amortecimento estrutural.



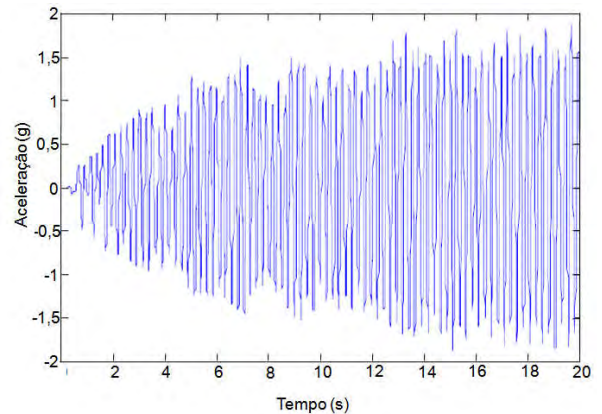
Figura 14 - Pessoa em pé sobre o sistema estrutural [Adaptado de Brownjohn, 1999]

Yao et al. (2002), através da realização de ensaios experimentais, mediram a força exercida por pessoas saltando com frequência de 2Hz sobre plataformas flexíveis com diferentes frequências naturais (4Hz e 6Hz). Os resultados demonstraram tanto o aumento da força quanto a diminuição da aceleração aplicada sobre a plataforma quando a mesma torna-se mais rígida. As Figuras 15 e 16 apresentam as respostas estruturais encontradas.

Posteriormente, Yao et al. (2006) realizaram outros ensaios, considerando a execução de saltos com frequência de 2Hz sobre estruturas móveis e flexíveis com frequências naturais de 2Hz e 4 Hz. As Figuras 17 e 18 exibem as respostas estruturais encontradas nestes ensaios. As mesmas conclusões do trabalho anterior foram encontradas neste trabalho, ou seja, foi verificado o aumento da força e a diminuição da aceleração aplicada sobre a plataforma quando a mesma torna-se mais rígida. Outra verificação realizada foi que ao se igualar a frequência da estrutura e da atividade rítmica, foram encontradas elevadas acelerações sobre a estrutura, ocasionando assim vibrações excessivas e desconforto humano, devido à ocorrência do fenômeno da ressonância.

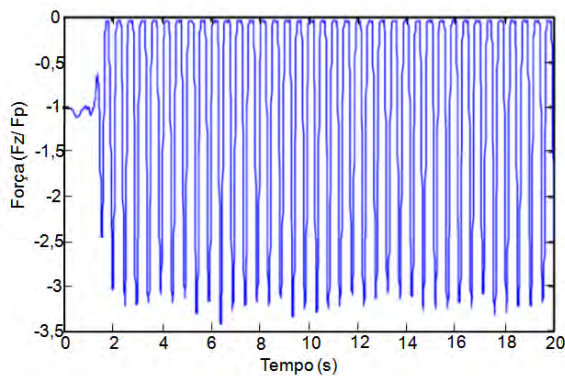


a) Força sobre a plataforma com frequência natural de 4Hz

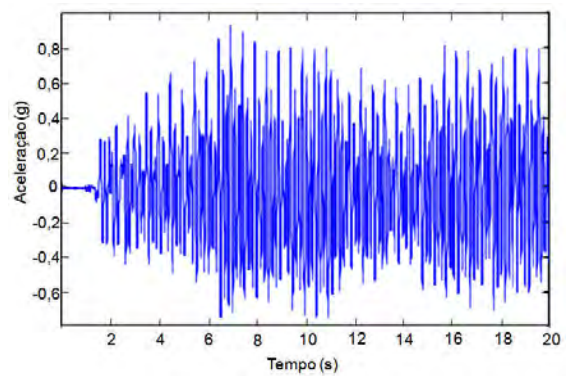


b) Aceleração sobre a plataforma com frequência natural de 4Hz

Figura 15 - Resposta dinâmica da plataforma aos saltos de 2 Hz - parte 1 [Adaptado de Yao et al., 2002]

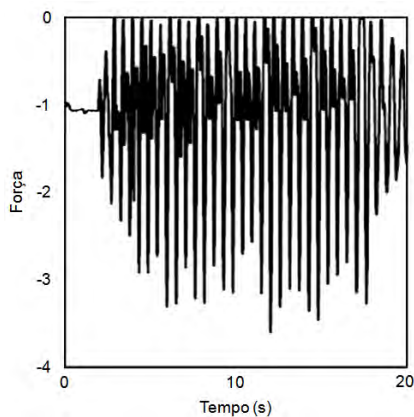


a) Força sobre a plataforma com frequência natural de 6Hz

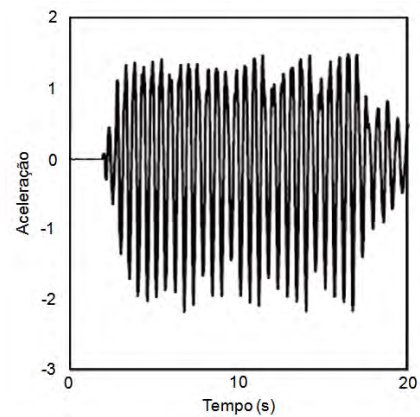


b) Aceleração sobre a plataforma com frequência natural de 6Hz

Figura 16 - Resposta dinâmica da plataforma aos saltos de 2 Hz - parte 2 [Adaptado de Yao et al., 2002]

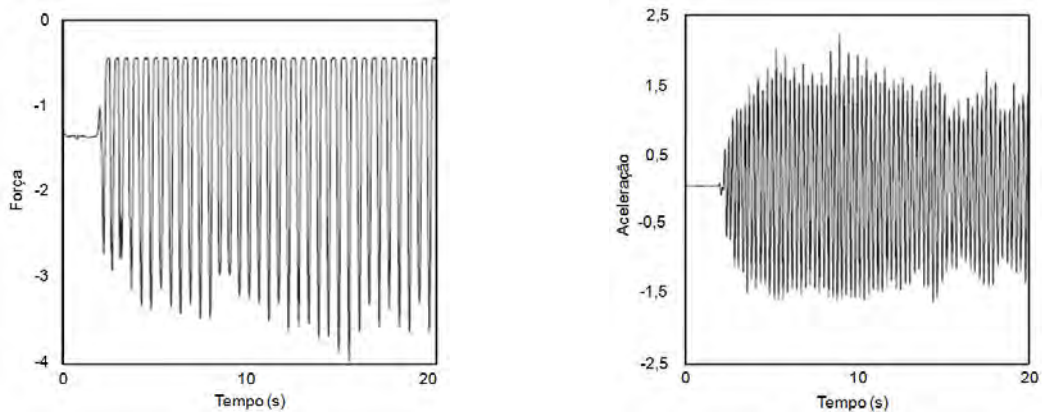


a) Força sobre a plataforma com frequência natural de 2Hz



b) Aceleração sobre a plataforma com frequência natural de 2Hz

Figura 17 - Resposta da plataforma aos saltos de 2 Hz - parte 1 [Adaptado de Yao et al., 2006]



a) Força sobre a plataforma com frequência natural de 4Hz

b) Aceleração sobre a plataforma com frequência natural de 4Hz

Figura 18 - Resposta da plataforma aos saltos de 2 Hz - parte 2 [Adaptado de Yao et al., 2006]

Sachse, Pavic e Reynolds (2003) investigaram a interação público-estrutura, a partir da revisão de publicações sobre este tema, e concluíram que os seres humanos não devem ser apenas considerados como massa adicional sobre a estrutura, ou seja, a presença dos seres humanos sobre as estruturas deve ser considerada como um sistema dinâmico do tipo massa-mola-amortecedor, interagindo com a estrutura.

Dougill et al. (2006) desenvolveram um modelo matemático para analisar a interação humano-estrutura para atividades humanas rítmicas oscilantes (sem perda de contato com o solo). O sistema do corpo humano e o sistema estrutural foram idealizados com um grau de liberdade, conforme visto na Figura 19. Os autores identificaram os parâmetros dinâmicos do corpo humano com frequência natural de 2,3Hz e razão de amortecimento de 0,25.

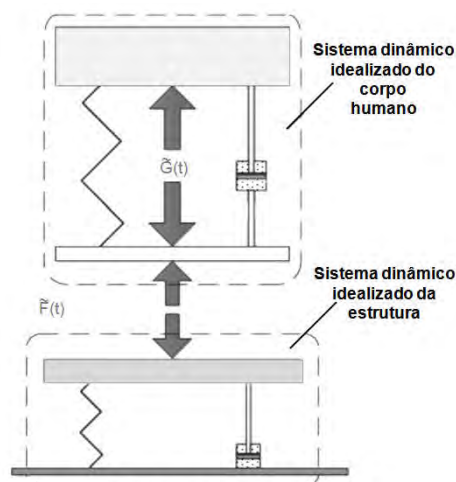


Figura 19 - Modelo ser humano-estrutura [Adaptado de Dougill et al., 2006]

Pavic e Reynolds (2008) analisaram, a partir da verificação do comportamento em uma arquibancada, a interação de pessoas ativas e passivas. A partir desta análise, sugeriram um modelo que apresenta três graus de liberdade, conforme pode ser visto na Figura 20. No grau de liberdade relacionado às pessoas ativas pode ser verificada a existência de uma força, denominada GLF (generated load factor). De acordo com os autores, esta força é diferente da força aplicada diretamente sobre a estrutura, que compõe os modelos de carregamento que consideram a aplicação de uma força externa pura. Os autores revelam que o modelo sugerido apresenta uma boa precisão quando comparado com os resultados experimentais encontrados em arquibancadas com carregamentos reais.

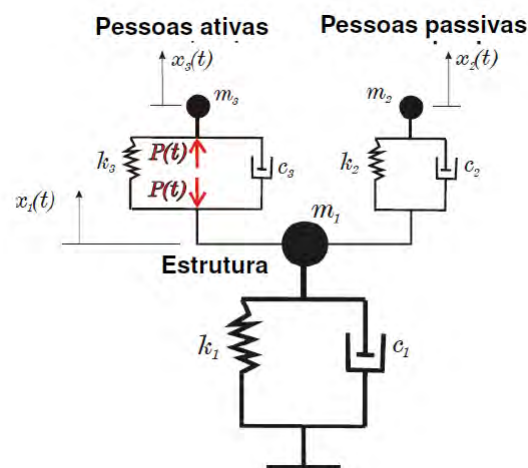


Figura 20 - Sistema composto por 3 graus de liberdade [Adaptado de Pavic e Reynolds, 2008]

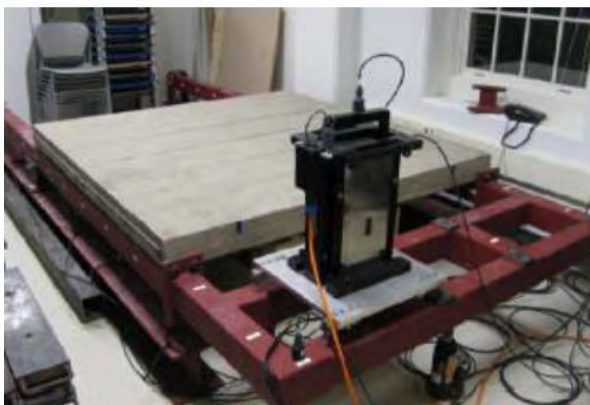
O guia de projeto Joint Working Group (JWG, 2008) recomenda a utilização do modelo desenvolvido por Pavic e Reynolds (2008). Cabe ressaltar que uma restrição importante apresentada por este modelo é referente às pessoas ativas, uma vez que somente se considera o efeito das pessoas balançando, ou seja, sem perda de contato com a estrutura.

Costa-Neves et al. (2014) avaliaram o comportamento de diferentes estruturas mistas destinadas a prática de atividades aeróbicas, como por exemplo ginástica aeróbica e dança. Através da realização da análise modal, verificou-se que as estruturas mistas investigadas apresentaram frequências fundamentais entre 4Hz e 8Hz, portanto são estruturas suscetíveis ao acontecimento de problemas de



vibrações excessivas causados pela prática de atividades humanas. As respostas dinâmicas da estrutura, em termos de acelerações de pico e deslocamentos, foram consideradas, respectivamente, inaceitáveis e aceitáveis, conforme as normas e critérios utilizados, o que corrobora com a verificação realizada pela análise modal.

Salyards e Noss (2014) efetuaram um estudo para investigar a interação dinâmica indivíduo-estrutura sobre uma estrutura (ver Figura 21), considerando diferentes valores de frequência natural da estrutura (variando de 4,21Hz a 8,05Hz) e diferentes proporções de massa (variando de 0,167 a 0,564), além dos ocupantes da estrutura se posicionarem com diferentes posturas durante a realização dos testes experimentais. Verificou-se que os ocupantes reduziram a frequência natural da estrutura flexível (4,21Hz), além de ter sido apurado que a redução na frequência natural da estrutura foi quase a mesma para todas as diferentes posturas praticadas. A estrutura com frequência natural de 6,27Hz apresentou um modo adicional de vibração devido a presença de pessoas. Também foi constatado que as pessoas em pé com os joelhos retos diminuíram a frequência natural da estrutura de forma mais significativa que as outras posturas, além de haver uma diferença significativa entre a influência dos ocupantes em pé e a massa adicionada equivalente. Por fim, para a estrutura com frequência natural de 8,05Hz, todas as posturas aumentaram ligeiramente a frequência natural da estrutura.



a) Estrutura vazia

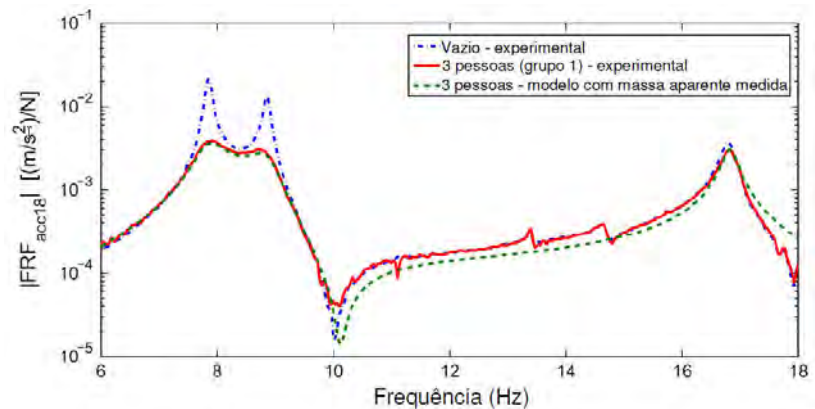


b) Estrutura ocupada

Figura 21 - Estrutura monitorada durante os ensaios (SALYARDS; NOSS, 2014)

Cappellini (2015) empregou um novo método para a modelagem da interação dinâmica indivíduo-estrutura, através da utilização de funções de resposta em frequência (FRFs). Estas funções aferem a relação entre os sinais de entrada (força) e de saída (aceleração) nos nós em que o contato do ser

humano com a estrutura ocorre. A partir deste novo método é possível, tomando como base a massa aparente das pessoas, que é medida experimentalmente através de um excitador, além de levar em consideração as propriedades da estrutura vazia (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento), determinar o efeito da interação humana para uma estrutura genérica, de acordo com a Figura 22.



a) Shaker (excitador)

b) Resposta dinâmica do sistema estrutural em três situações diferentes

Figura 22 - Modelagem da interação dinâmica (CAPPELLINI, 2015)

Ainda de acordo com Cappellini (2015), existe uma tendência das frequências naturais dos sistemas estruturais diminuírem devido à presença de pessoas. No entanto, alguns autores indicam um aumento nos valores das frequências naturais e até mesmo a presença de um modo de vibração adicional.

He et al. (2017) investigaram a interação homem-estrutura em uma passarela com frequência fundamental de 2,83Hz. Os autores selecionaram sete diferentes relações de massa (0,025 a 0,291), além da consideração de diferentes posturas das pessoas durante a realização dos testes (ver Figura 23). A frequência natural fundamental da estrutura foi alterada significativamente devido ao envolvimento humano, tendo em vista que a estrutura era relativamente flexível. A diferença percentual na frequência natural da estrutura foi de 15% quando a estrutura estava ocupada por indivíduos em pé com joelhos retos (relação de massa = 0,291), além da taxa de amortecimento da estrutura ter aumentado drasticamente de 0,42% para 1,44% para as pessoas com os joelhos retos.



a) Pessoas com os pés levantados

b) Pessoas com os joelhos retos



c) Pessoas com os joelhos flexionados

Figura 23 - Visualização da postura das pessoas durante os testes realizados (He et al., 2017)

De acordo com Ji, Zhou e Han (2017), a interação dinâmica indivíduo-estrutura pode ser avaliada sob dois aspectos principais: como o sistema estrutural influencia a resposta e o conforto humano (BOCIAN et al., 2015; RACIC; CHEN, 2015; SALYARDS; HUA, 2015); e como as pessoas afetam as propriedades dinâmicas e a resposta estrutural (CAPPELLINI et al., 2016; CHEN et al., 2015; ING´OLFSSON; GEORGAKIS, 2011; QIN; YANG; YANG, 2012; QIN et al., 2013). O primeiro aspecto está associado à forma com que as características dinâmicas estruturais (massa, rigidez, amortecimento e frequência natural), considerando tanto pisos flexíveis quanto pisos rígidos, podem interferir na vibração do sistema estrutural que está submetido às ações dinâmicas, como por exemplo, as atividades humanas, bem como na percepção humana às vibrações. Quanto ao segundo aspecto, o mesmo diz respeito aos efeitos da presença humana sobre a estrutura na mudança das propriedades dinâmicas estruturais e vibrações excessivas da mesma.

Shahabpoor et al. (2017) investigaram os efeitos causados por pessoas paradas e também pessoas caminhando sobre as propriedades modais do sistema estrutural, através da realização de experimentos. Os testes experimentais foram realizados com 3, 6 e 10 pessoas paradas sobre a estrutura. A análise modal experimental revelou que a frequência natural da estrutura sofreu redução ao se comparar a estrutura vazia com a estrutura ocupada, conforme pode ser verificado na Figura 24. Outra constatação realizada foi o aumento da taxa de amortecimento de 0,60%, quando a estrutura estava vazia, para 2,60%, quando 10 pessoas estavam ocupando a estrutura.

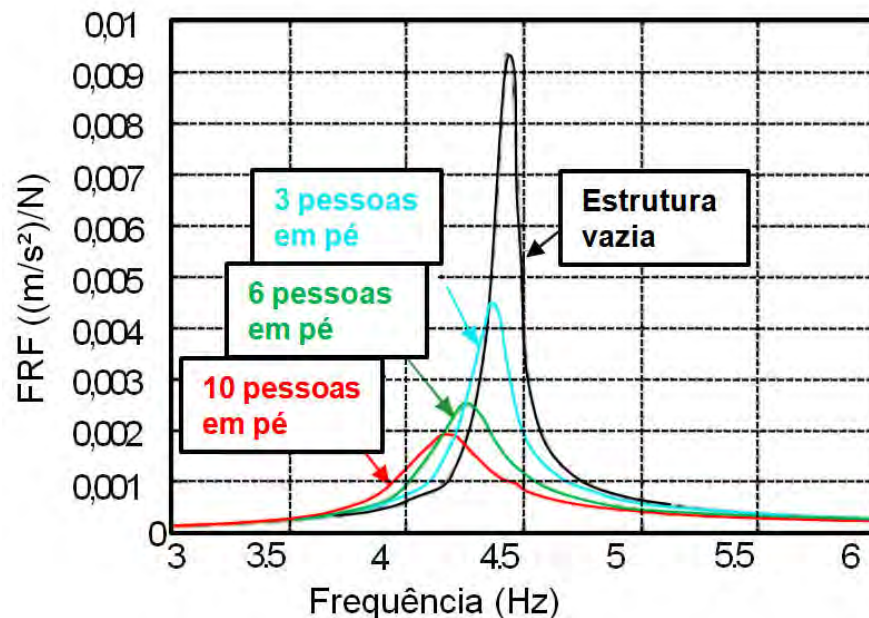


Figura 24 - FRF da estrutura ocupada com diferentes números de pessoas [Adaptado de Shahabpoor et al. (2017)]

Vasilatou, Harrison e Nikitas (2017) desenvolveram um modelo de interação dinâmica ser humano-estrutura (HSDI) para projetos de arquibancadas permanentes sujeitas a vibração oriunda de multidão. Em seu estudo, os autores consideraram que o modelo possuía um grau de liberdade para representar as pessoas balançando lateralmente. Segundo os autores, a aplicação do modelo desenvolvido em uma arquibancada real de um estádio indica que as reduções nas respostas são possíveis.

Em seu trabalho, Czwikla e Kasperski (2017) analisaram a dispersão aleatória entre pessoas nos parâmetros dinâmicos do corpo humano, aplicando a abordagem

teórica que tem sido usada para a diretriz IstructE (2008). Os autores também realizaram testes em campo para estudar a interação dinâmica indivíduo-estrutura durante a prática da atividade dinâmica humana (saltos). Os resultados obtidos sugerem que os parâmetros dinâmicos do corpo humano dependem do tipo de atividade e da frequência da atividade. Os autores concluíram que um modelo realista requer que os parâmetros dinâmicos sejam dependentes da frequência do corpo humano.

De acordo com Catbas et al. (2017), a maioria dos estudos da última década tem verificado alterações nos valores de amortecimento e frequência causadas pelas modificações no número de ocupantes passivos, nas suas posturas e nas suas atividades. De acordo com os autores, a observação geral de que maiores taxas de massa produzem uma diminuição nas frequências e um aumento nas taxas de amortecimento continua a ser válida em geral, embora existam poucas exceções que contestam essa constatação. Ainda de acordo com o autor, outros estudos afirmam que as mudanças nas taxas de amortecimento dependem da postura e da frequência.

Em seu trabalho, Gaspar (2018), com o objetivo de determinar os sinais da força dos saltos, realizou ensaios experimentais sobre uma plataforma rígida e um piso flexível, apoiadas sobre células de carga, conforme pode ser visto na Figura 25. Estas plataformas foram submetidas a saltos realizados com quatro frequências diferentes (1,89Hz; 2,00Hz; 2,27Hz e 2,86Hz). Analisando os resultados obtidos e que estão presentes na Tabela 7, verificou-se que ocorreu uma redução nos valores de força de pico ( $F_p$ ), quando comparados os resultados da plataforma rígida com o piso flexível. A referida redução foi maior para as frequências de 1,89Hz e 2,00Hz (28% e 25%, respectivamente), que possuíam o 2º harmônico próximo à frequência fundamental da estrutura ( $f=3,84$ Hz). As reduções foram de 18% e 13%, respectivamente, para as frequências que não possuíam harmônicos próximos à frequência fundamental da estrutura (2,27Hz e 2,86Hz). Similarmente, a Tabela 8 mostra o mesmo comportamento que ocorreu com relação às forças de pico para os valores de aceleração, velocidade e deslocamento.



a) Saltos na superfície rígida

b) Saltos na superfície flexível

Figura 25 - Saltos realizados sobre uma plataforma (Gaspar, 2018)

Tabela 7 - Força dura gerada pela pessoa sobre a plataforma de força (GASPAR, 2018)

Atividade rítmica	Pavimento rígido	Piso flexível	Redução (%)
	Força (N)	Força (N)	
1,89Hz (113bpm)	$F_p=3258$ $F_{rms}=1174$	$F_p=2348$ $F_{rms}=1011$	-28% -14%
2,00Hz (120bpm)	$F_p=3487$ $F_{rms}=1207$	$F_p=2613$ $F_{rms}=1023$	-25% -15%
2,27Hz (136bpm)	$F_p=3425$ $F_{rms}=1231$	$F_p=2798$ $F_{rms}=1082$	-18% -12%
2,86Hz (172bpm)	$F_p=3055$ $F_{rms}=1180$	$F_p=2664$ $F_{rms}=1064$	-13% -10%

Tabela 8 - Deslocamentos, velocidades e acelerações das pessoas (GASPAR, 2018)

Atividade rítmica	Pavimento rígido			Piso flexível		
	Acel (m/s <sup>2</sup> )	Vel (m/s)	Desl (m)	Acel (m/s <sup>2</sup> )	Vel (m/s)	Desl (m)
1,89Hz (113bpm)	$a_p=60,81$ $a_{rms}=19,13$	$v_p=2,35$ $v_{rms}=1,24$	$d_p=0,14$ $d_{rms}=0,10$	$a_p=16,76$ $a_{rms}=3,43$	$v_p=0,74$ $v_{rms}=0,20$	$d_p=0,07$ $d_{rms}=0,02$
2,00Hz (120bpm)	$a_p=69,30$ $a_{rms}=21,12$	$v_p=2,34$ $v_{rms}=1,24$	$d_p=0,12$ $d_{rms}=0,09$	$a_p=39,82$ $a_{rms}=15,38$	$v_p=1,88$ $v_{rms}=1,07$	$d_p=0,12$ $d_{rms}=0,08$
2,27Hz (136bpm)	$a_p=76,04$ $a_{rms}=22,26$	$v_p=2,09$ $v_{rms}=1,13$	$d_p=0,12$ $d_{rms}=0,07$	$a_p=48,38$ $a_{rms}=16,55$	$v_p=2,00$ $v_{rms}=0,98$	$d_p=0,10$ *(0,16) $d_{rms}=0,07$
2,86Hz (172bpm)	$a_p=71,90$ $a_{rms}=21,84$	$v_p=1,58$ $v_{rms}=0,93$	$d_p=0,10$ $d_{rms}=0,05$	$a_p=44,46$ $a_{rms}=16,27$	$v_p=1,38$ $v_{rms}=0,79$	$d_p=0,09$ $d_{rms}=0,04$

Notas:  $a_p$ ,  $v_p$  e  $d_p$  referem-se aos valores máximos (positivos) dos sinais de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente.  
\* Valor atípico entre parênteses.

#### 1.4 Modelagem biodinâmica do carregamento devido a atividades humanas rítmicas

O trabalho de Matsumoto e Griffin (2003) buscou representar o comportamento dinâmico do corpo humano através de uma modelagem biodinâmica, utilizando sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com poucos graus de liberdade. A Figura 26 ilustra exemplos dos modelos estudados pelos autores. Os modelos 1a e 1b possuem sistemas com um grau de liberdade, onde o modelo 1b se difere do modelo 1a por apresentar uma massa rígida em sua base. Os modelos 2a, 2b, 2c e 2d apresentam sistemas com dois graus de liberdade, onde os modelos 2b e 2d possuem uma massa rígida em suas respectivas bases e os modelos 2a e 2b contêm os graus de liberdade em série, enquanto os graus de liberdade dos modelos 2c e 2d são em paralelo.

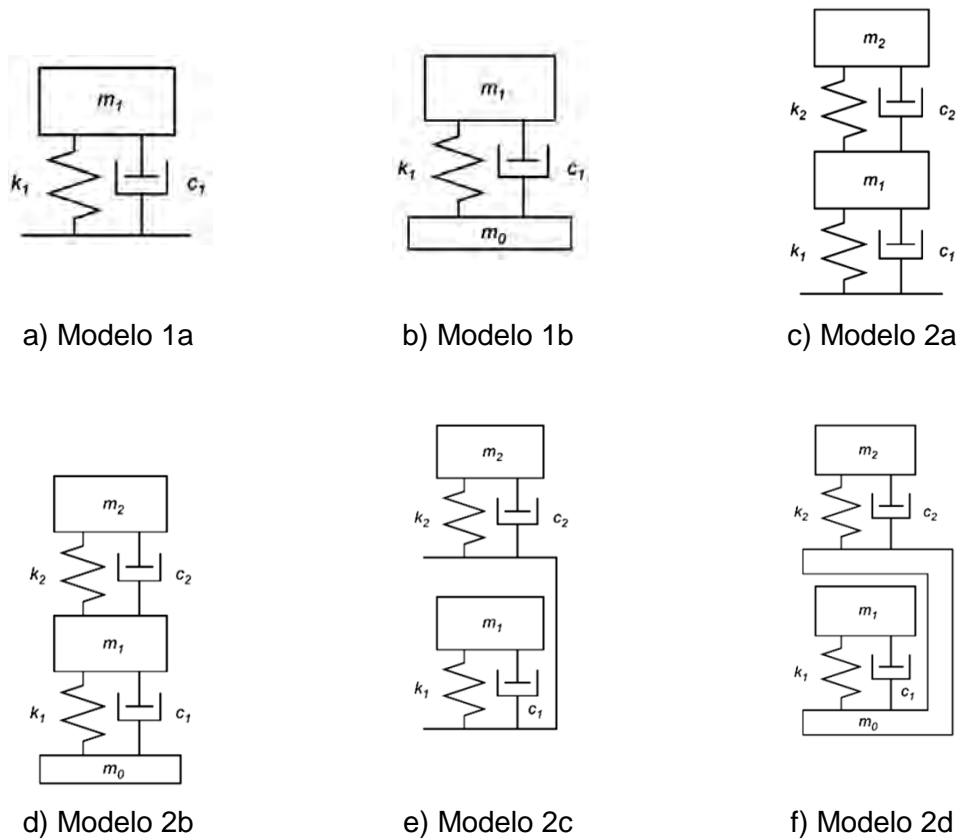


Figura 26 - Modelos biodinâmicos (MATSUMOTO; GRIFFIN, 2003)

Sachse, Pavic e Reynolds (2004), investigaram modelos biodinâmicos que se adequassem para serem utilizados na engenharia civil, tomando como base a realização de ensaios experimentais e os dados obtidos em trabalhos anteriores. Os autores recomendaram modelos possuindo sistemas com um grau de liberdade com valores de frequências naturais na faixa de 5Hz a 6Hz, além de valor médio de massa modal igual a 80% da massa da pessoa e valor de amortecimento crítico na faixa de 30% a 50%.

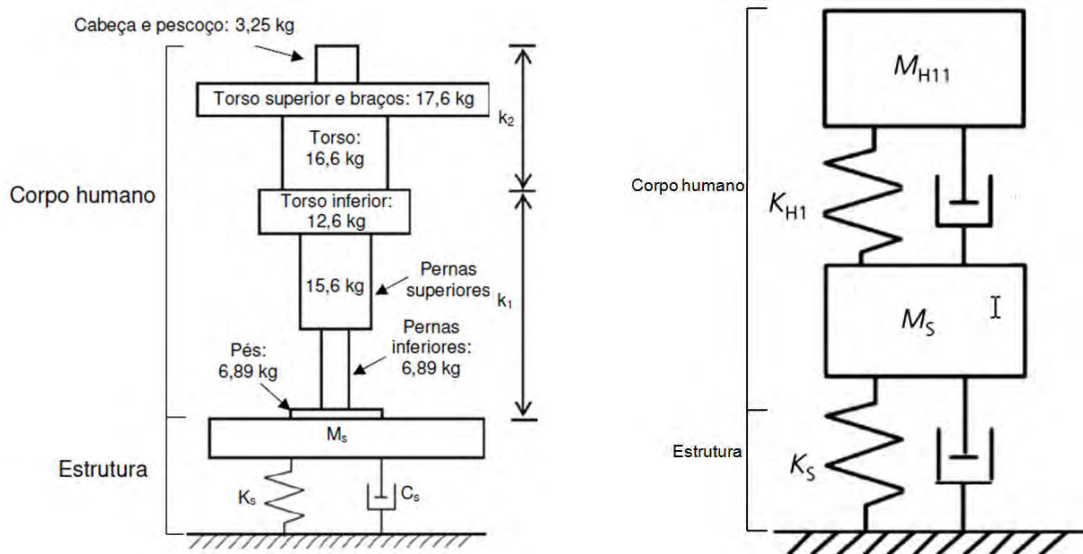
Ibrahim (2006), em suas investigações, elaborou uma lista contendo a representação das propriedades dinâmicas referentes ao corpo humano para um grau e variados graus de liberdade em diversas posturas.

Jones, Reynolds e Pavic (2011) destacaram que uma quantidade limitada de estudos foi realizada para se caracterizar as propriedades dinâmicas de multidões em situações reais, apesar de já terem sido desenvolvidos diversos modelos biodinâmicos para a representação do corpo humano. Os autores destacam que a maioria dos estudos realizados é baseada em resultados de pessoas e grupos pequenos de pessoas que são extrapolados para multidões.



Ainda de acordo com Jones, Reynolds e Pavic (2011), a interação dinâmica ser humano-estrutura é estabelecida como a combinação das características dinâmicas (rigidez, massa e amortecimento) do ser humano e do sistema estrutural, que resulta em um conjunto singular que possui novas propriedades dinâmicas.

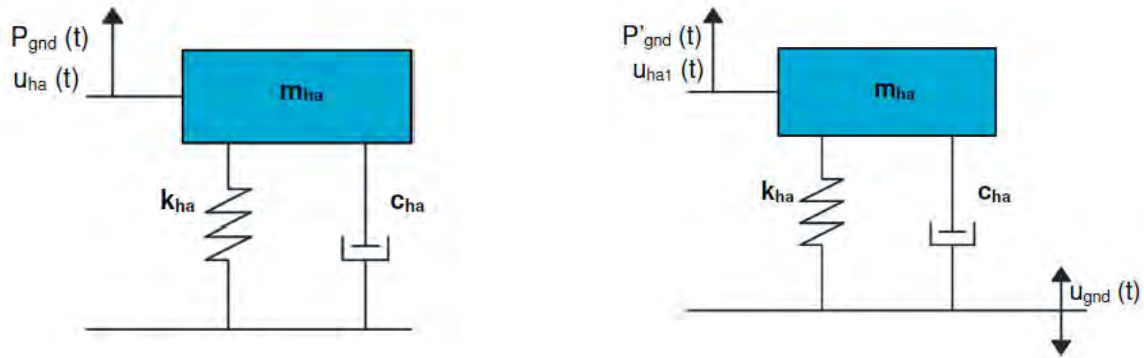
Ji, Zhou e Zhang (2013) elaboraram um modelo antropomórfico que considera a distribuição da massa ao longo da altura da pessoa e assim sugeriram um modelo contínuo para representar o corpo humano. O referido modelo decompõe a massa da pessoa em pé em sete partes associadas a duas diferentes constantes de rigidez ( $k_1$  e  $k_2$ ). De acordo com os autores, este modelo leva em consideração a massa total da pessoa contribuindo para a vibração ao invés de considerar somente partes do corpo da pessoa, que é usual em modelos biodinâmicos de base fixa. A comparação entre o modelo sugerido pelos autores e o modelo de base fixa é apresentada na Figura 27.



a) Modelo biodinâmico “contínuo”                      b) Modelo biodinâmico de base fixa  
 Figura 27 - Comparação entre modelos biodinâmicos [Adaptado de Ji, Zhou e Zhang, 2013]

Silva, Brito e Pimentel (2013) e Toso et al. (2016) estudaram um modelo biodinâmico com sistema de um grau de liberdade para representar o movimento vertical da atividade humana rítmica de caminhar, que está ilustrado na Figura 28, que se baseia no deslocamento relativo entre o centro de gravidade do corpo humano ( $u_{ha}$ ;  $u_{ha1}$ ) e o centro de gravidade da superfície ( $u_{gnd}$ ). De acordo com os autores, este modelo considera que a força dinâmica referente ao “oscilador

humano” reflete a força de reação do piso, sendo que tal força pode ser aferida a partir de uma plataforma de força.



a) Superfície rígida

b) Superfície em vibração

Figura 28 - Modelo de interação ativa com 1 grau de liberdade (SILVA; BRITO; PIMENTEL, 2013; TOSO et al., 2016)

A equação (9) apresenta o equilíbrio dinâmico sobre uma superfície rígida, ao passo que a equação (10) retrata o equilíbrio dinâmico sobre uma superfície em vibração. De acordo com Silva, Brito e Pimentel (2013) e Toso et al. (2016), o nível de vibração do sistema estrutural e o padrão da caminhada são capazes de influenciar os parâmetros modais. Os autores, através de ensaios experimentais, aferiram a aceleração no centro de gravidade da pessoa, com a utilização de um acelerômetro, e a força gerada pelo caminhar humano, através do emprego de uma plataforma de força. Os parâmetros relacionados ao corpo humano foram obtidos através da solução de um sistema com três equações não-lineares, baseado na aceleração do sistema, como pode ser visto na equação (11). Cabe ressaltar que foram considerados os valores dos três primeiros harmônicos da transformada de Fourier da aceleração e da força, obtidos experimentalmente.

$$m_{ha} \ddot{u}_{ha}(t) + c_{ha} \dot{u}_{ha}(t) + k_{ha} u_{ha}(t) = P_{gnd}(t) \quad (9)$$

$$m_{ha} \ddot{u}_{ha1}(t) + c_{ha} [\dot{u}_{ha1}(t) - \dot{u}_{gnd}(t)] + k_{ha} [u_{ha1}(t) - u_{gnd}(t)] = P'_{gnd}(t) \quad (10)$$

$$A(\omega_j) = \frac{\omega_j^2 P_{gnd}(\omega_j)}{\left| -m_{ha} \omega_j^2 + i c_{ha} \omega_j + k_{ha} \right|} \quad j=1, 2, 3 \quad (11)$$

Toso et al. (2016), tomando como base testes experimentais relacionados com trinta e cinco pessoas, relacionaram, a partir de técnicas de regressão, os parâmetros do corpo humano em função da massa estática ( $M_h$ ) e da frequência do passo da atividade ( $f_p$ ), de maneira que a massa ( $m_{ha}$ ), o amortecimento ( $c_{ha}$ ) e a rigidez ( $k_{ha}$ ) modal pudessem ser determinados através das equações (12), (13) e (14).

$$m_{ha}(f_p, M_h) = -231,34 + 3,69M_h + 154,06f_p - 1,97M_h f_p + 0,005M_h^2 - 15,25f_p^2 \quad (12)$$

$$c_{ha}(m_{ha}, M_h) = -1115,69 + 92,56M_h - 108,94m_{ha} + 2,91M_h m_{ha} - 1,33M_h^2 - 1,30m_{ha}^2 \quad (13)$$

$$k_{ha}(f_p, M_h) = 75601,45 - 1295,32M_h - 33786,75f_p + 506,44M_h f_p + 3,59M_h^2 + 539,39f_p^2 \quad (14)$$

Neste modelo se considera a aplicação da força dinâmica no grau de liberdade relativo à massa do corpo humano, diferentemente dos modelos biodinâmicos anteriores, onde a força era aplicada no ponto de contato entre os pés e a superfície da estrutura, ou seja, no grau de liberdade da estrutura.

Zhang, Georgakis e Chen (2016) propuseram um modelo para representar o movimento vertical da atividade humana rítmica de caminhar sobre uma superfície rígida através de um sistema com um grau de liberdade que apresenta um par interno de forças biodinâmicas ( $F_{bio}$ ), que é inserido no equilíbrio dinâmico do sistema da pessoa, conforme ilustrado na Figura 29. Este modelo proposto por Zhang, Georgakis e Chen (2016) difere do modelo estudado por Silva, Brito e Pimentel (2013) e Toso et al. (2016), uma vez que a força de reação da superfície da estrutura não atua diretamente sobre a massa da pessoa, mas sim a força dinâmica, conforme visto na equação (15).

A partir deste modelo uma das componentes do par interno de forças biodinâmicas ( $F_{bio}$ ) atua no centro de massa da pessoa e a outra componente contribui para a força de reação do solo, assim como a força elástica e a força de amortecimento. O equilíbrio na base do sistema de um grau de liberdade é apresentado na equação (16). A equação (17) é obtida ao se reordenar a equação (16).

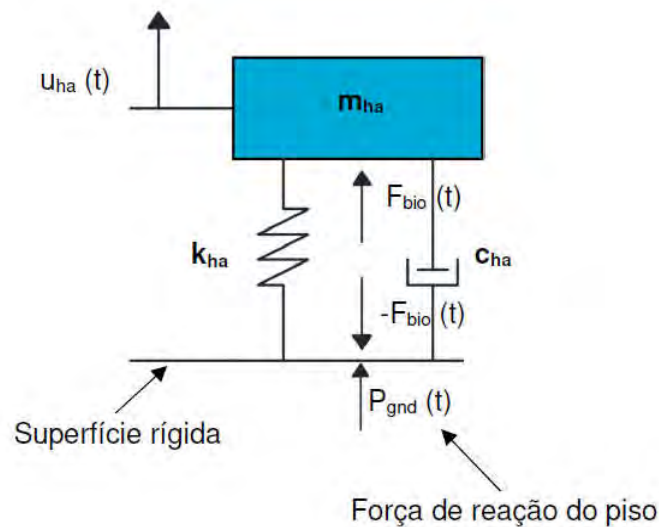


Figura 29 - Modelo de interação ativa de 1 grau de liberdade (ZHANG; GEORGAKIS; CHEN, 2016)

$$m_{ha} \ddot{u}_{ha}(t) + c_{ha} \dot{u}_{ha}(t) + k_{ha} u_{ha}(t) = F_{bio}(t) \quad (15)$$

$$-F_{bio}(t) + c_{ha} \dot{u}_{ha}(t) + k_{ha} u_{ha}(t) = -P_{gnd}(t) \quad (16)$$

$$F_{bio}(t) = P_{gnd}(t) + c_{ha} \dot{u}_{ha}(t) + k_{ha} u_{ha}(t) \quad (17)$$

Ao substituir a equação (17) na equação (15), se obtém a equação (18), que expõe a existência de uma relação direta entre a força de inércia da pessoa e a força de reação do solo. Cabe salientar que os autores presumiram que a massa modal da pessoa é igual a sua massa estática ( $m_{ha}=M_h$ ), além do fator de amortecimento da pessoa ser igual a 30% (SHAHABPOOR; PAVIC; RACIC, 2016).

$$m_{ha} \ddot{u}_{ha} = P_{gnd}(t) \quad (18)$$

Os ensaios experimentais realizados por Salyards e Hua (2015) tinham como objetivo a investigação dos parâmetros dinâmicos relativos ao corpo humano fornecidos pelo guia de projeto JWG (2008). Os autores realizaram ensaios em laboratório com 1, 4, 8, 16 e 19 pessoas sobre um piso de concreto armado, analisando três diferentes posturas: pessoas sentadas e pessoas em pé com joelhos retos - situação passiva, e pessoas em pé com joelhos fletidos - situação ativa. Ao compararem os resultados com o guia de projeto JWG (2008), foi apurado que os

parâmetros para pessoas ativas foram retratados adequadamente, enquanto os parâmetros para pessoas passivas não foram bem representados.

Campista e Silva (2018a) investigaram o comportamento estrutural das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha quando submetidas ao carregamento dinâmico humano através da utilização da modelagem biodinâmica, onde a interação dinâmica indivíduo-estrutura foi modelada numericamente mediante o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL). Os resultados obtidos pela modelagem biodinâmica foram comparados com os resultados encontrados a partir da utilização do modelo de carregamento proposto por Faisca (2003). Verificou-se que existe uma diferença percentual significativa entre os resultados encontrados no modelo biodinâmico e no modelo de carregamento proposto por Faisca (2003). Segundo os autores, esta diferença pode ser explicada pelo fato do modelo de carregamento proposto por Faisca (2003) ser um modelo de força dura, sendo assim um modelo conservador, que considera que todas as pessoas estão saltando em ressonância com a estrutura, enquanto que no modelo biodinâmico, considera-se que as pessoas possuem características distintas (massa, rigidez e amortecimento), além de considerar que as pessoas não estão em fase umas com as outras, sendo um modelo mais próximo da realidade.

## 1.5 Critérios de conforto humano

Várias normas, critérios de projeto e guias práticos têm sido desenvolvidos, com a finalidade de servirem de base a projetistas e construtores, para que, em conjunto, consigam minimizar os efeitos nocivos das vibrações. Com o intuito de abordar a aceitabilidade do nível de vibração em estruturas no que tange aos critérios de conforto humano, abaixo serão apresentadas algumas das recomendações prescritas por normas técnicas e guias de projeto.

### 1.5.1 Norma Brasileira - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado: NBR 6118 (2014)

A norma NBR 6118 (2014) fixa os requisitos básicos necessários para o projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, exceto aquelas em que se empregam concreto leve, pesado ou outros especiais. Além disso, estabelece os requisitos gerais a serem atendidos pelo projeto como um todo, bem como os requisitos específicos relativos a cada uma de suas etapas.

De acordo com esta norma, a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais. Com o objetivo de assegurar um comportamento satisfatório das estruturas sujeitas à vibração, deve-se afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura ( $f$ ) da frequência crítica ( $f_{crítica}$ ), que depende da destinação da edificação, de acordo com a equação (19).

$$f_n > 1,2 f_{crítica} \quad (19)$$

O comportamento das estruturas sujeitas às ações dinâmicas cíclicas que originam vibrações pode ser modificado por meio de alterações de alguns fatores, como a frequência natural, através da mudança da rigidez da estrutura ou da massa em vibração, e o aumento das taxas de amortecimento estrutural. Adotam-se os valores indicados na Tabela 9 para a  $f_{crítica}$ , na falta de valores determinados experimentalmente.

Tabela 9 - Frequência natural mínima requerida (NBR 6118, 2014)

Caso	$f_{crítica}$ (Hz)
Ginásio de esportes	8,0
Sala de dança ou de concertos sem cadeiras fixas	7,0
Escritórios	3,0 a 4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,4
Passarelas de pedestres ou ciclistas	1,6 a 4,5

Esta norma revela que, em casos especiais onde as suas prescrições não puderem ser atendidas, uma análise dinâmica mais acurada deve ser realizada, conforme estabelecida em recomendações internacionais, enquanto não existir norma brasileira específica para este fim.

Ainda de acordo com a referida norma, no que se refere à aceitabilidade sensorial em relação a vibrações de pisos, é estabelecido um limite igual a  $L/350$ , onde  $L$  é o menor vão do piso e o deslocamento estático é aquele gerado pelas cargas acidentais.

#### 1.5.2 Norma Brasileira - Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios: NBR 8800 (2008)

A norma NBR 8800 (2008) determina os requisitos básicos que devem ser respeitados nos projetos de estruturas de aço e mistas de aço e concreto de edificações. No item 11.4.1, que trata dos estados-limites de serviço referentes à vibrações de pisos, a referida norma indica que os sistemas de pisos suscetíveis a vibrações devem ser dimensionados de forma a se evitar o surgimento de vibrações transientes inaceitáveis, de acordo com o Anexo L.

O item L.1.2, presente no Anexo L da referida norma, estabelece que a frequência natural de pisos nunca deve ser inferior a 3Hz. Ainda no Anexo L, o item L.3.3 indica que nos pisos em que existe a prática de atividade humana rítmica, como por exemplo, pisos de academias de ginástica e de estádios de esporte, a menor frequência natural deve ser superior a 6Hz e para os casos onde a atividade acontece de forma muito repetitiva, deve ser superior a 8Hz. Essas condições ficam satisfeitas, se o deslocamento vertical total da estrutura gerado pelas ações permanentes, ao se excluir a parcela dependente do tempo, e pelas ações variáveis, considerando as vigas como biapoiadas e usando as combinações frequentes de serviço, não ultrapassar os valores de 9mm e 5mm, respectivamente.

### 1.5.3 Norma ISO - International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibrations): ISO 2631/1 (1985)

Segundo a norma ISO 2631/1 (1985), as vibrações afetam as pessoas de muitas formas, causando desconforto, problemas de saúde, diminuição da capacidade de concentração e eficiência no trabalho ou enjoo, em caso de vibrações que possuam frequência muito baixa. A vibração das estruturas pode alterar o conforto dos ocupantes a partir da frequência, da direção que atinge o corpo humano e de seu comportamento ao longo do tempo, se contínua, intermitente ou transitória. Além disso, a percepção e a tolerância à vibração dependem do local, do tipo de atividade, do horário e da expectativa de conforto.

Esta norma define métodos de medida da vibração de corpo inteiro, além, de indicar os principais fatores que se combinam para determinação do grau de aceitabilidade à exposição da vibração. A referida norma apresenta informações e orienta quanto aos possíveis efeitos da vibração sobre a saúde e o conforto, apresentando três níveis de sensibilidade humana às vibrações:

1) Limite da redução do conforto: quando atividades como comer, ler e escrever são prejudicadas com o nível de vibração a que as pessoas ficam expostas;

2) Queda da eficiência: ocorre deficiência na realização de determinada atividade, podendo ocasionar, no caso de longa exposição, efeitos de fadiga nas pessoas;

3) Limite do tempo de exposição: define o limite máximo que uma pessoa pode ficar exposta a uma perturbação sem que possa causar algum dano à saúde e a sua segurança.

A faixa de frequência coberta é de 1Hz a 80Hz, ou seja, dentro desta faixa que se considera os efeitos de carregamento periódico ou vibrações transientes.



De acordo com a norma, para a avaliação da vibração, deve ser feito o cálculo da aceleração *rms* ponderada, em relação a um sistema de coordenadas, que é dado pela equação (20). As direções do sistema de coordenadas podem ser encontradas na Figura 30.

$$a_w = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Onde  $a_w$ : aceleração ponderada (translacional ou rotacional) em função do tempo; T: período de tempo no qual a aceleração é medida.

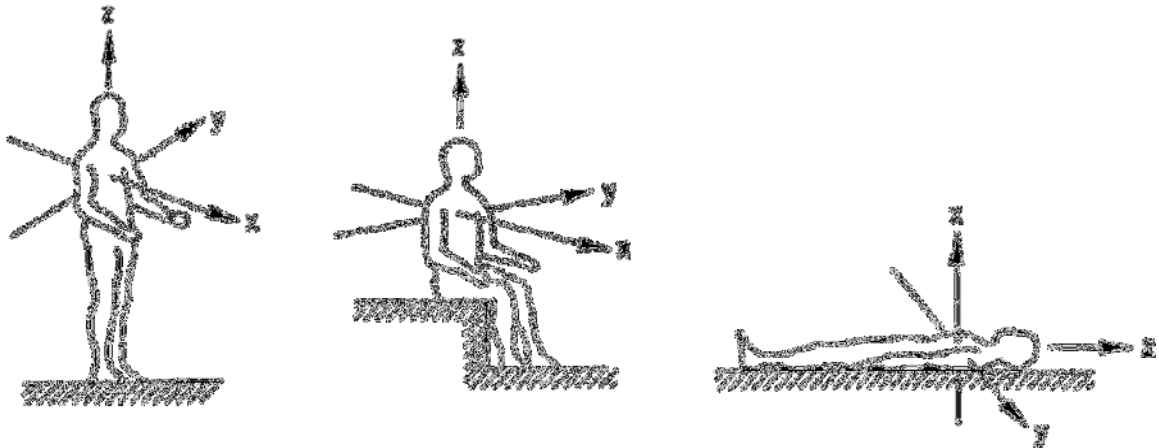


Figura 30 - Direções dos sistemas de coordenadas (ISO 2631/1, 1985)

A ISO 2631/1 (1985) apresenta ábacos com curvas iso-sensitivas de aceleração máxima em *rms* em função da frequência de excitação, e para diferentes tempos de exposição, variando de 1 minuto até 24 horas. A Figura 31 ilustra o gráfico com os limites de fadiga, para diferentes tempos de exposição, na direção z, enquanto que a Figura 32 mostra o gráfico com os limites de fadiga, para diferentes valores de tempo de exposição, nas direções x e y. Com relação ao limite de exposição, deve-se multiplicar por 2 os valores dos limites mostrados nos gráficos e, para o limite de conforto reduzido, deve-se dividi-los por 3,15.

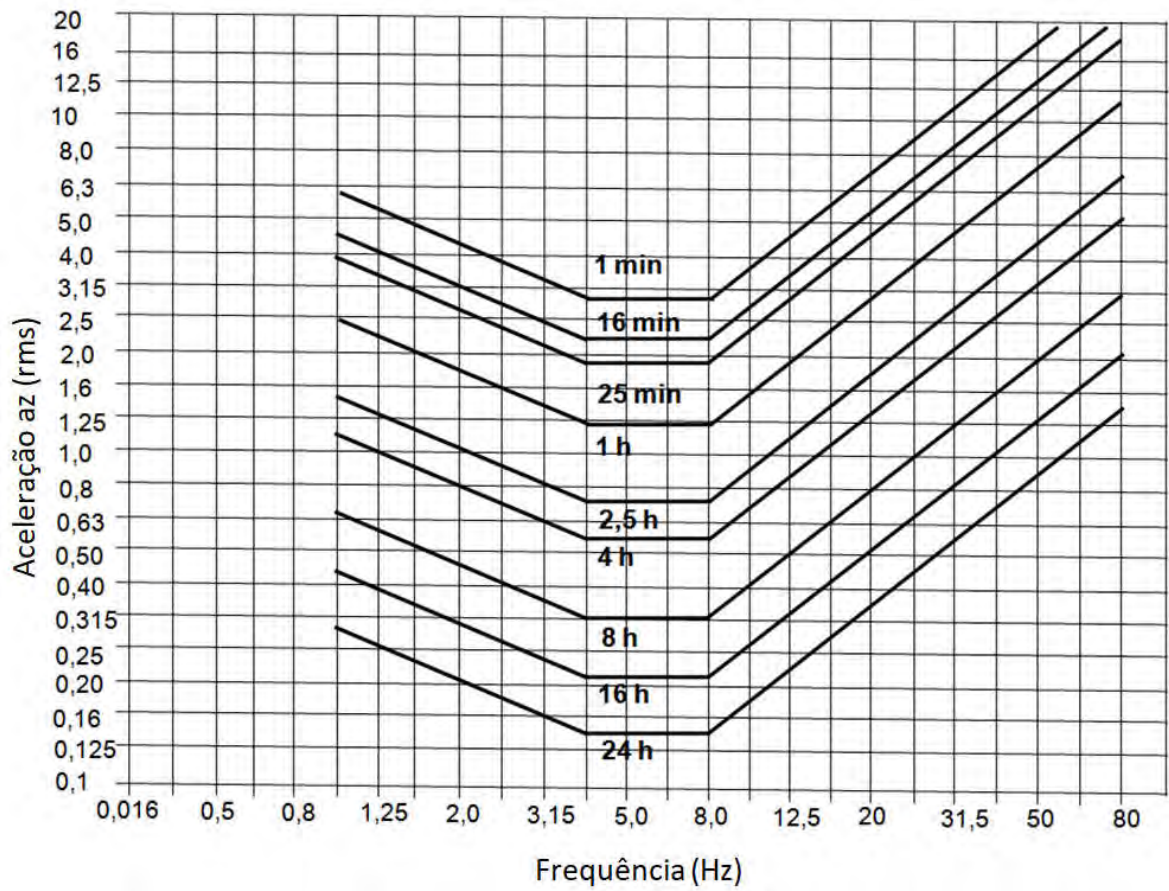


Figura 31 - Limites para aceleração em z (ISO 2631/1, 1985)

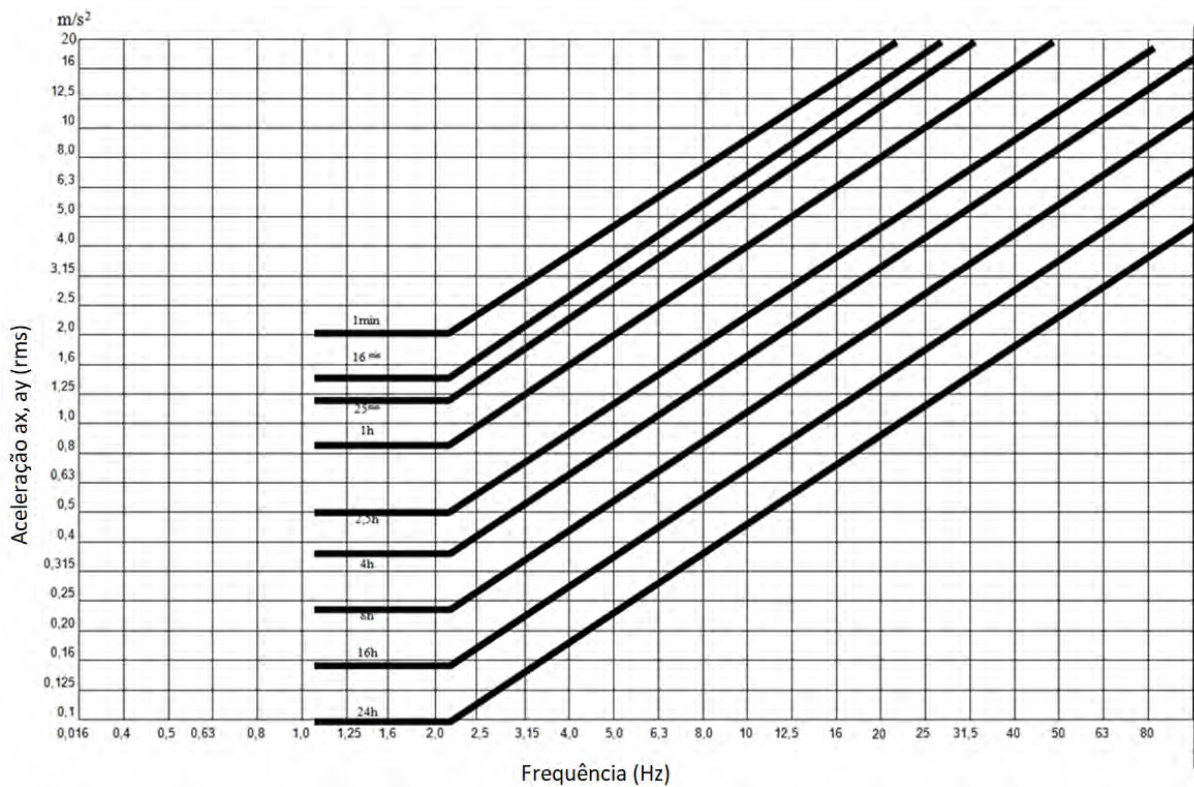


Figura 32 - Limites para aceleração em x ou y (ISO 2631/1, 1985)

#### 1.5.4 Norma ISO - International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibrations): ISO 2631/1 (1997)

Esta revisão da norma ISO 2631/1 (1997) substituiu o método detalhado (análise por faixa de frequência) utilizado na edição anterior, por um método simplificado, que simplesmente relaciona valores calculados de aceleração equivalente com o tempo de exposição.

A percepção humana em relação às vibrações depende da frequência do movimento e da posição (em pé, sentado ou deitado) em que o indivíduo se encontra diante da vibração, conforme mostrado na Figura 33.

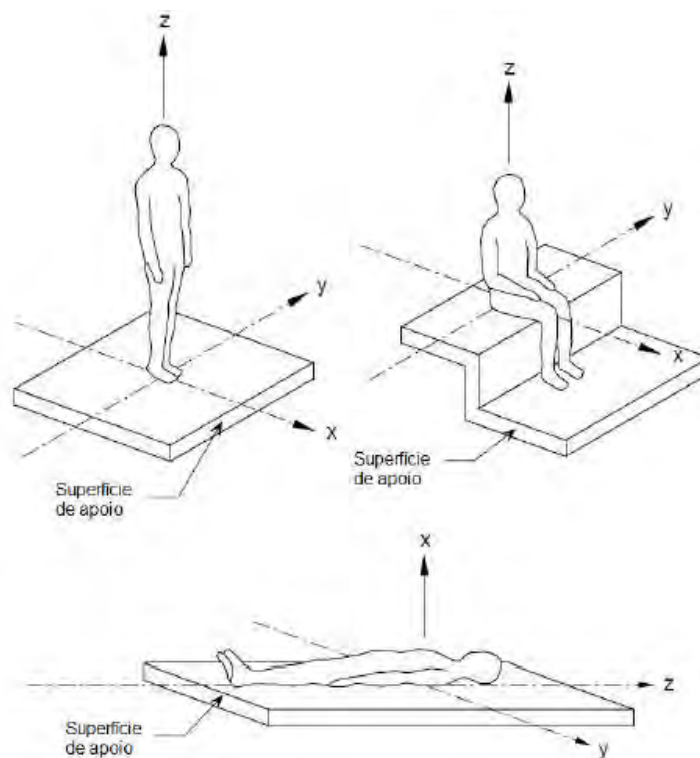


Figura 33 - Direções dos sistemas de coordenadas para vibrações mecânicas influenciando pessoas (ISO 2631/1, 1997)

A avaliação da vibração, da mesma maneira que era considerada na ISO 2631/1 (1985), deve ser realizada o cálculo da aceleração *rms* ponderada em relação a um sistema de coordenadas, de acordo com a equação (20), já apresentada.

De acordo com esta norma, os valores aceitáveis de acelerações com relação ao conforto humano dependem de muitos fatores, como por exemplo, temperatura e ruído acústico. Os valores presentes na Tabela 10 têm como objetivo apresentar uma indicação aproximada das prováveis reações humanas com relação ao conforto humano.

Tabela 10 - Limites de aceleração (ISO 2631/1, 1997)

Limites de aceleração (m/s <sup>2</sup> )	Reação
< 0,315	Não desconfortável
0,315 – 0,63	Um pouco desconfortável
0,5 – 1,0	Bastante desconfortável
0,8 – 1,6	Desconfortável
1,25 – 2,5	Muito desconfortável
> 2,0	Extremamente desconfortável

A Figura 34 apresenta as principais curvas de ponderação apresentadas nesta norma. Estas curvas representam fatores que atribuem pesos diferentes para movimentos com frequências diferentes. A curva  $W_d$  é utilizada para as vibrações nos eixos x e y, enquanto a curva  $W_k$  é utilizada para as vibrações no eixo z.

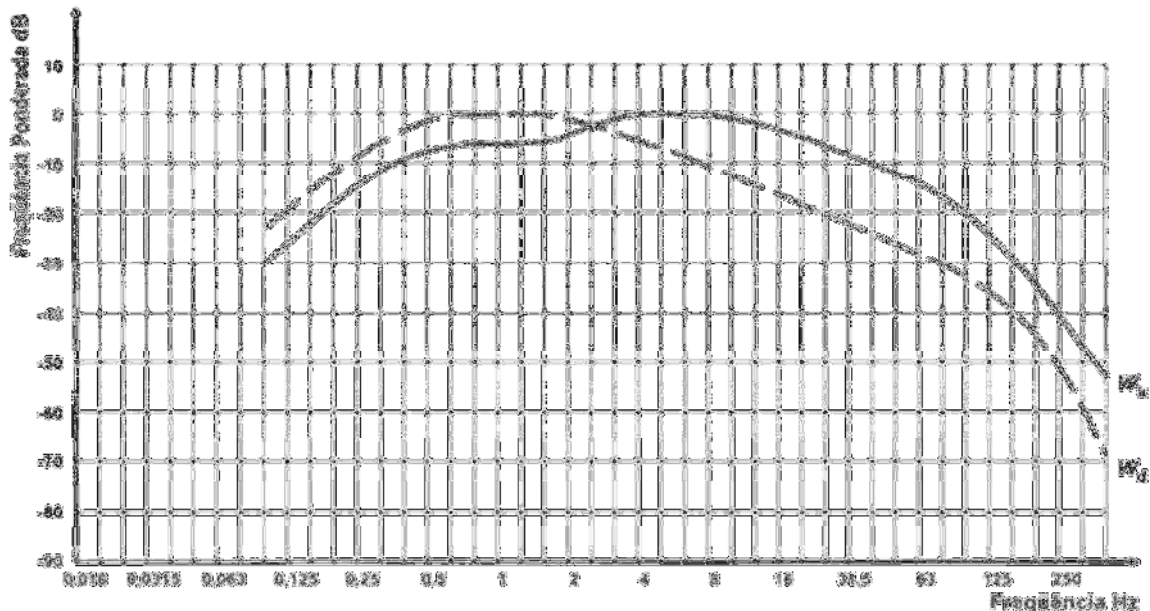


Figura 34 - Curvas de ponderação em função da frequência (ISO 2631/1, 1997)

A partir dos valores de aceleração obtidos, é possível calcular a aceleração combinada ponderada da vibração em coordenadas ortogonais através da equação (21).

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (21)$$

Onde  $a_v$ : aceleração combinada ponderada;  $a_{wx}$ : aceleração ponderada do eixo ortogonal x;  $a_{wy}$ : aceleração ponderada do eixo ortogonal y;  $a_{wz}$ : aceleração ponderada do eixo ortogonal z;  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ : fatores multiplicadores ( $k_x=k_y = 1,4$  e  $k_z=1,0$ ).

De acordo com esta norma, assumindo que as respostas da vibração estão relacionadas à energia, dois diferentes tempos de exposição diária são equivalentes, baseado na equação (22).

$$a_{w1} t_1^{1/2} = a_{w2} t_2^{1/2} \quad (22)$$

Onde  $a_{w1}$ : aceleração ponderada, em *rms*, para a primeira exposição;  $a_{w2}$ : aceleração ponderada, em *rms*, para a segunda exposição;  $t_1$ : duração correspondente à primeira exposição;  $t_2$ : duração correspondente à segunda exposição.

Outros estudos indicam uma dependência do tempo de acordo com a equação (23):

$$a_{w1} t_1^{1/4} = a_{w2} t_2^{1/4} \quad (23)$$

Segundo esta norma e observando a Figura 35, a zona de precaução, que indica potencial de risco à saúde, é delimitada por linhas tracejadas, que foram geradas a partir da equação (22). Acima da linha superior indica prováveis riscos à saúde e abaixo da linha inferior, os efeitos à saúde não foram claramente documentados e/ou objetivamente observados.

É destacado pela norma que a zona de precaução à saúde tanto para a equação (22) quanto para a equação (23) são a mesma no período de duração de 4h a 8h. Este é o período onde é encontrada a maioria das observações dos efeitos da vibração à saúde.

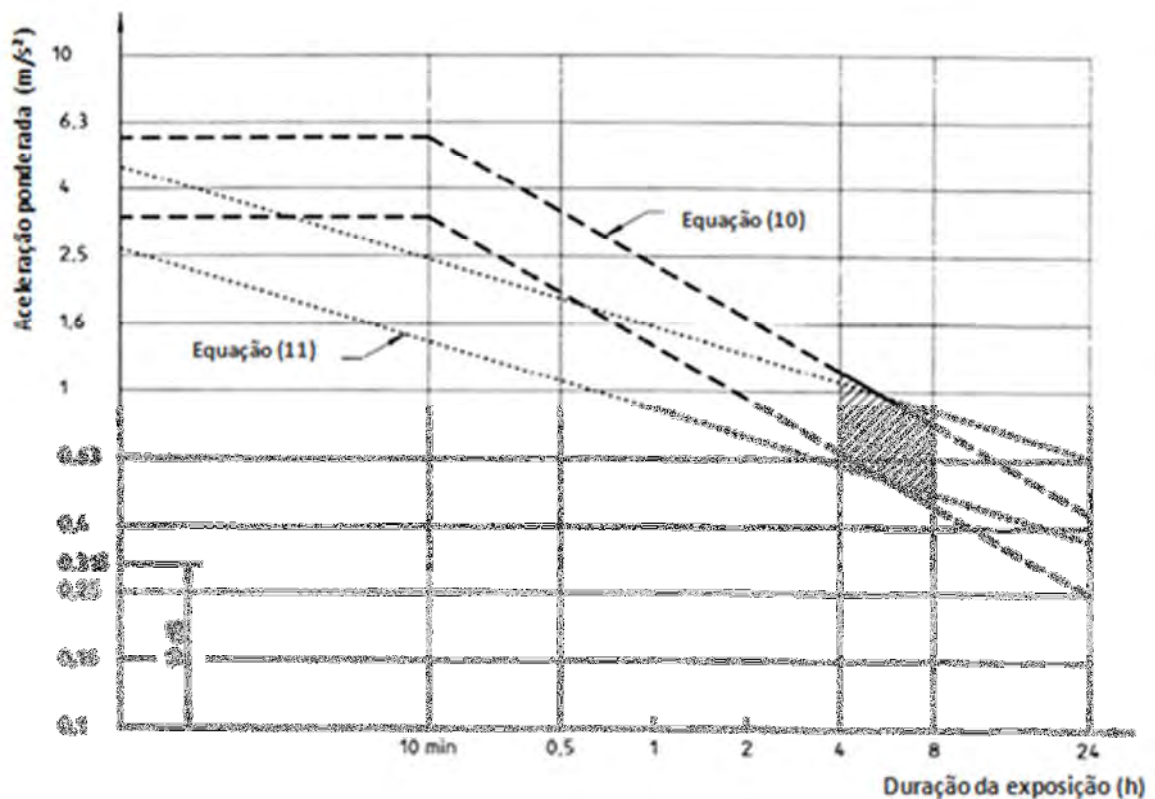


Figura 35 - Zonas de precaução à saúde (ISO 2631/1, 1997)

Em alguns casos, o método de se avaliar os valores de aceleração em *rms* pode subestimar os efeitos de vibração quando existem consideráveis valores de pico. Portanto, para casos que possuam valores de pico consideráveis, se recomenda que as acelerações sejam avaliadas em valores de dose de vibração (Vibration Dose Values), VDV, cujo cálculo é definido pela equação (24).

$$VDV = \left[ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right]^{1/4} \quad (24)$$

Onde  $a_w(t)$ : aceleração ponderada (translacional ou rotacional) como função do tempo; T: período de tempo em que a aceleração é medida.

### 1.5.5 CEB 209 (1991)

O CEB, em 1991, lançou o Boletim 209, que possui recomendações sobre a resposta humana às vibrações, devido ao carregamento dinâmico induzido por pessoas em diversos tipos de estrutura, como estádios, academias, passarelas e outras. A percepção humana com relação às vibrações é afetada por diversos parâmetros, entre eles, a direção da incidência da vibração em relação ao corpo humano, a atividade que está sendo realizada e a frequência de ocorrência da atividade. Conforme mostra a Tabela 11, pode-se perceber que para cada tipo de atividade humana é fornecida a faixa da frequência de excitação.

Tabela 11 - Faixas de frequência para os primeiros harmônicos (CEB209, 1991)

Atividade	Frequência da excitação (Hz)
Andar	1,6 a 2,4
Correr	2,0 a 3,5
Saltar	1,8 a 3,4
Dançar hard rock	1,5 a 3,0
Dançar light rock	1,5 a 3,0
Movimento lateral do corpo	0,6
Aplaudir e mover o corpo de pé	1,6 a 2,4

Na Tabela 12 são fornecidos os valores de aceleração máxima e velocidade máxima relacionados aos níveis de percepção humana. Esta tabela foi confeccionada a partir de valores coletados e comparados de diversos autores que pesquisaram sobre o assunto. De acordo com o CEB 209 (1991), existe uma tolerância para os valores sugeridos na Tabela 12 de até duas vezes os valores indicados.

Tabela 12 - Faixas de percepção humana devido à vibração vertical (CEB 209, 1991)

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

#### 1.5.6 Guia do SCI/2009

A publicação P354 concebida pelo The Steel Construction Institute (SCI) fornece um guia de orientação que permite a determinação da resposta de vibração de pisos com maior precisão. Este guia preconiza que a aceleração deve ser avaliada em termos de aceleração *rms*, ao invés de aceleração máxima, pois fornece uma melhor indicação de como a vibração varia ao longo do tempo. Além disso, da mesma maneira que as normas ISO 10137 (2007) e BS 6472-1 (2008), o guia preconiza que a percepção humana em relação à vibração depende da direção de incidência da vibração para o corpo humano, além da frequência da vibração, pois a sensibilidade do corpo humano se altera de acordo com esses parâmetros. O cálculo do valor limite da aceleração é realizado com a utilização de coeficientes de ponderação, que são fornecidos pelas normas BS 6841 (1987) e ISO 2631-1 (1997). Estas curvas dependem da direção de vibração e da atividade praticada, as três mais comuns são apresentadas graficamente nas Figuras 36 e 37, e são versões simplificadas das curvas da norma BS 6841(1987).



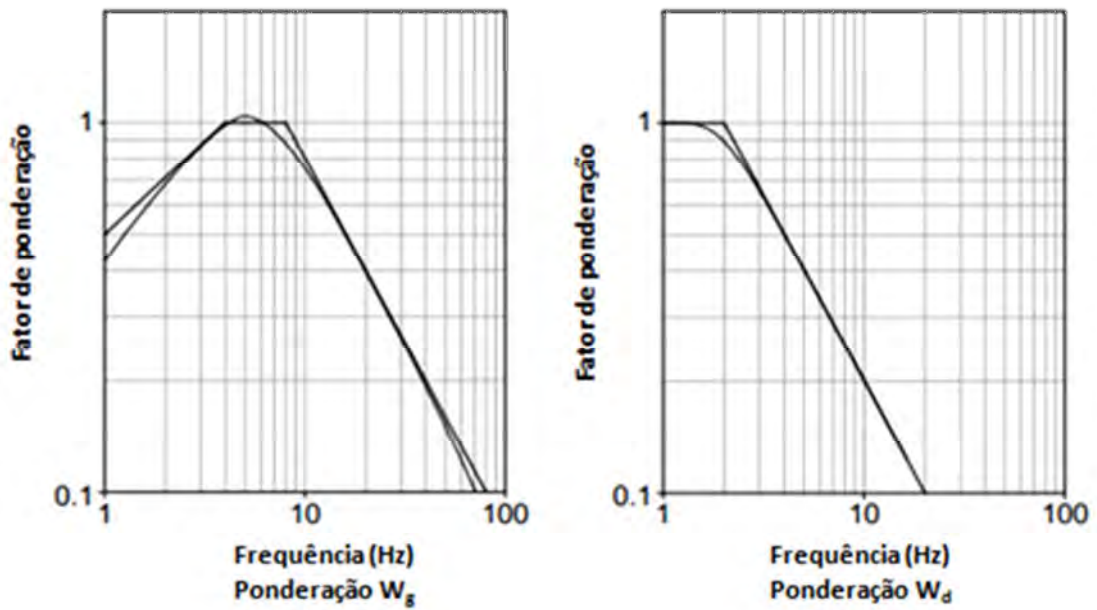


Figura 36 - Curvas de ponderação  $W_g$  e  $W_d$  (SCI, 2009)

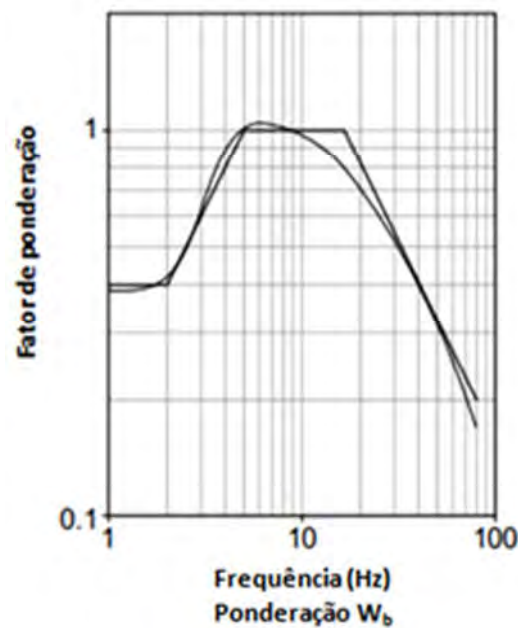


Figura 37 - Curva de ponderação  $W_b$  (SCI, 2009)

O guia SCI recomenda que para a avaliação das vibrações, no caso de vibrações intermitentes, devem ser utilizados valores de dose de vibração (VDV), conforme as normas BS 6472 (1992) e ISO 10137 (2007), que descrevem os níveis de percepção, ocasionados por vibrações de curta duração. A equação (25) apresenta o cálculo da aceleração em VDV.

$$VDV = \left[ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right]^{1/4} \quad (25)$$

Onde VDV: aceleração em valores de dose de vibração;  $a_w(t)$ : aceleração ponderada (translacional ou rotacional) como função do tempo;  $t$ : período de tempo em que a aceleração é medida.

O guia recomenda que sejam considerados os valores limites de aceleração de pico fornecidos pelo guia prático do AISC (2003). Os valores da Tabela 13 foram obtidos a partir de testes onde níveis menos extremos de som e luz eram impostos sobre a multidão.

Tabela 13 - Reação a vários níveis de aceleração em arquibancadas em termos da aceleração da gravidade-  $g = 9,81 \text{ m / s}^2$  (SCI, 2009)

Aceleração <i>rms</i> (% g)	Resposta equivalente fator, R	Reação
< 3,5	< 69,4	Limite aceitável
< 12,7	< 249,7	Perturbador
< 24,7	< 342,7	Inaceitável
> 24,7	> 342,7	Provável condição de pânico

### 1.5.7 Critérios utilizados

Com relação aos critérios de avaliação do conforto humano, conforme informado anteriormente, várias normas e guias de projeto estabelecem critérios quanto aos valores limites de aceitação para atividades humanas rítmicas. Cabe ressaltar que ainda não existe um único critério consensual para realizar a avaliação do conforto humano, levando em consideração os aspectos subjetivos que envolvem esta avaliação. Salienta-se que estes limites se referem às vibrações verticais.

Neste estudo, para as acelerações de pico será utilizado o limite estabelecido por Murray et al. (2016), que utiliza a faixa limite de  $0,40 \text{ m/s}^2$  a  $0,70 \text{ m/s}^2$ .

Com relação aos limites utilizados para as acelerações em *rms*, serão considerados neste estudo os limites estabelecidos pela ISO 2631/1 (1997) e por

Smith et al. (2009). A Tabela 14 apresenta os limites da ISO 2631/1 (1997) e a Tabela 15 mostra os limites utilizados por Smith et al. (2009).

Tabela 14 - Limites de aceleração em *rms* (ISO 2631/1, 1997)

Limites de aceleração em <i>rms</i> (m/s <sup>2</sup> )	Reação
< 0,315	Não desconfortável
0,315 – 0,63	Um pouco desconfortável
0,5 – 1,0	Bastante desconfortável
0,8 – 1,6	Desconfortável
1,25 – 2,5	Muito desconfortável
> 2,0	Extremamente desconfortável

Tabela 15 - Limites de aceleração em *rms* (SCI, 2009)

Limites de aceleração em <i>rms</i> (m/s <sup>2</sup> )	Reação
< 0,35	Limite aceitável
0,35 – 1,27	Perturbador
1,27 – 2,47	Inaceitável
> 2,47	Provável condição de pânico

Por fim, para as acelerações em valores de doses de vibração (VDV), os limites considerados serão os estabelecidos por Setareh (2012), que se encontra na Tabela 16, e por Ellis e Littler (2004), presente na Tabela 17.

Tabela 16 - Limites de aceleração em VDV (SETAREH, 2012)

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

Tabela 17 - Limites de aceleração em VDV (ELLIS E LITTLER, 2004)

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

## 1.6 Considerações do capítulo

Neste capítulo foram apresentados diversos trabalhos de autores no que diz respeito à análise de vibrações de sistemas estruturais submetidos a atividades humanas rítmicas, a caracterização dinâmica de atividades humanas rítmicas, a interação dinâmica indivíduo-estrutura, a modelagem biodinâmica do carregamento e, por fim, foram apresentados critérios utilizados para a avaliação do conforto humano em estruturas submetidas a vibrações devido à ação dinâmica humana.

## 2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é apresentada uma descrição detalhada dos ensaios experimentais realizados no Laboratório de Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ (PGECIV/FEN/UERJ). Os equipamentos utilizados, assim como as respostas obtidas, nos ensaios experimentais também são descritos no presente capítulo.

Nos ensaios experimentais, através da utilização de três células de carga e de um acelerômetro, foram obtidos os valores de força e aceleração, respectivamente, que uma pessoa exerce sobre uma plataforma. Esses valores foram posteriormente utilizados para a determinação das características dinâmicas das pessoas (massa, rigidez e amortecimento), a partir da resolução matemática de um problema de otimização, através do emprego de Algoritmos Genéticos (AG), via uso do programa MATLAB (2017).

Tanto os valores de força e aceleração, obtidos durante a realização dos ensaios experimentais, quanto os valores das características dinâmicas humanas, foram utilizados na modelagem biodinâmica do carregamento humano com o objetivo de simular a prática da atividade humana rítmica (torcida).

### 2.1 Descrição dos testes experimentais

Na Figura 38 está representado o fluxograma contendo as etapas efetuadas antes da realização dos ensaios experimentais. O Laboratório de Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ (PGECIV/FEN/UERJ) foi definido como local para a realização dos ensaios experimentais.

O valor de 2,20Hz foi escolhido como o valor da frequência de excitação do carregamento humano, onde o primeiro harmônico ( $1 \times 2,20\text{Hz} = 2,20\text{Hz}$ ) apresenta um valor que contribui para forçar um movimento ressonante da arquibancada com o segundo modo de vibração vertical ( $f_{02}=2,28\text{Hz}$ , ver Tabela 25). Nesse sentido, esse valor foi definido levando em consideração que a frequência de excitação do carregamento humano corresponde a uma das frequências naturais do sistema estrutural.

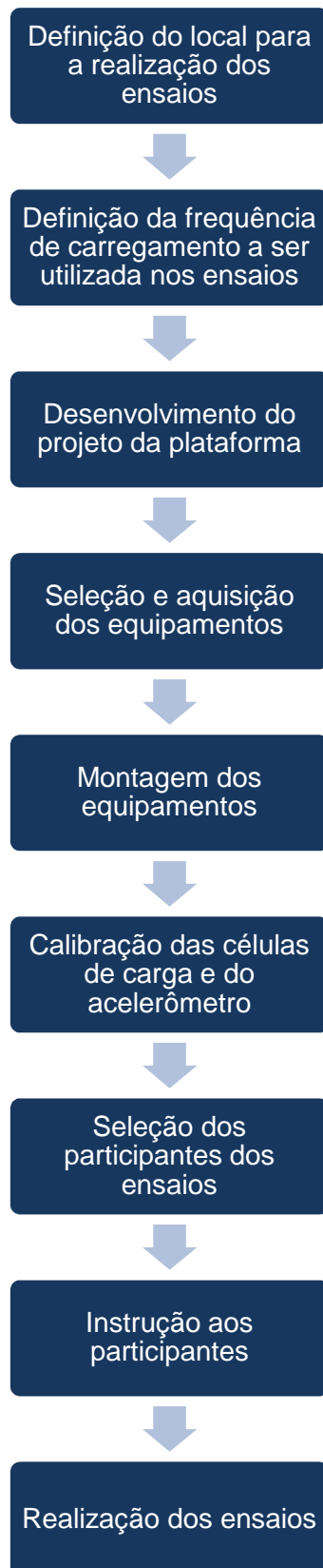


Figura 38 - Fluxograma com as etapas necessárias para a realização dos ensaios

Ao longo do desenvolvimento do projeto da plataforma, definiu-se que a mesma seria do material MDF, com dimensões de 600mm x 600mm x 25mm. Nesse contexto, a plataforma se caracteriza por ser uma estrutura rígida, onde as suas frequências naturais não interagem com a frequência do carregamento humano, sendo o ser humano idealizado, de forma simplificada, como um sistema de um grau de liberdade (massa, mola e amortecedor).

Os equipamentos selecionados para a realização dos ensaios foram: três células de carga acopladas em uma plataforma de MDF, um acelerômetro localizado no centro de gravidade da pessoa, uma plataforma de MDF, um metrônomo, um sistema de aquisição de dados ADS 2002 e um computador. Estes equipamentos estão representados na Figura 39.

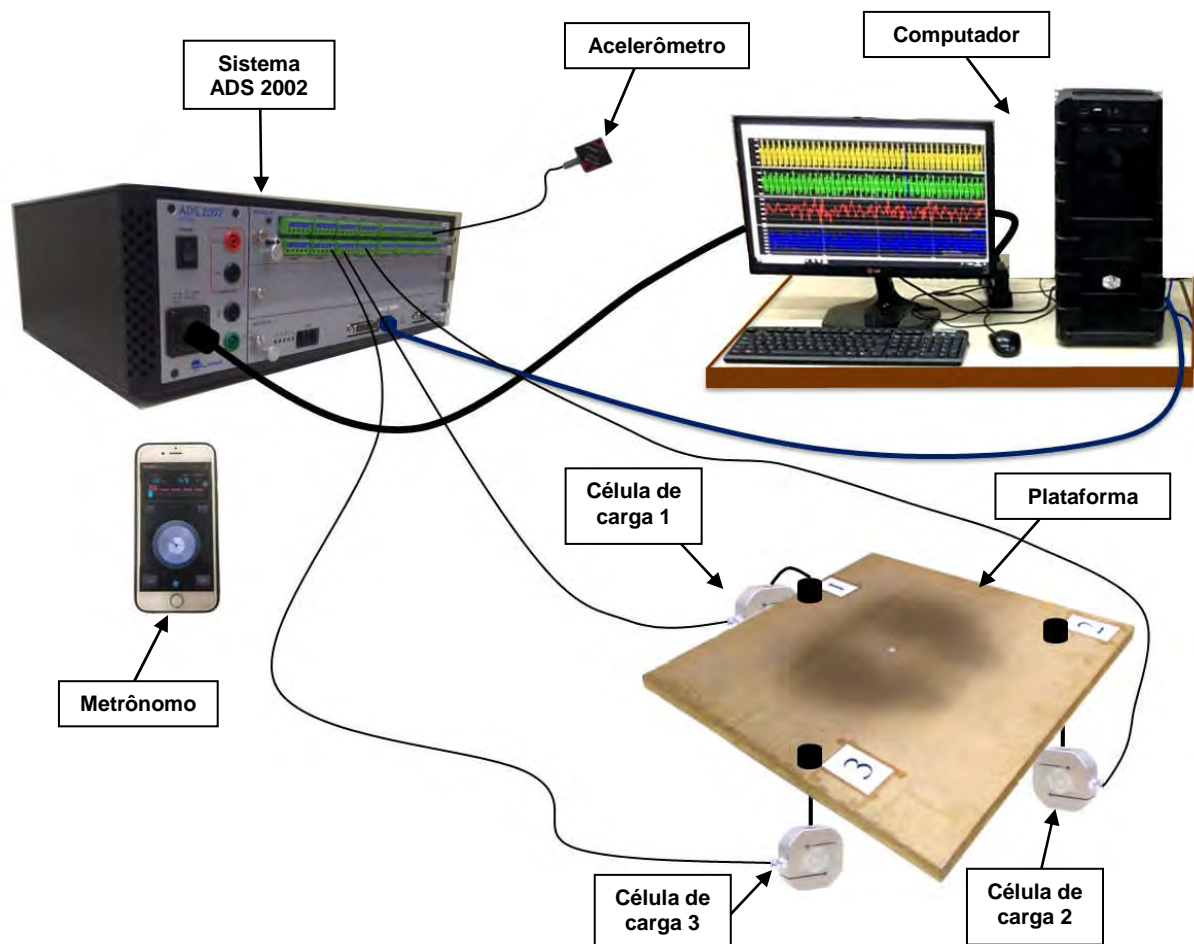


Figura 39 - Conjunto de equipamentos utilizados para a realização dos ensaios

As três células de carga foram posicionadas estrategicamente de modo a garantir que o centro de gravidade do conjunto coincidissem com o centro de gravidade da plataforma. O esquema referente ao posicionamento das células de carga é apresentado na Figura 40. Cabe ressaltar que os saltos foram realizados o mais próximo possível do centro de gravidade do sistema (plataforma + três células de carga).

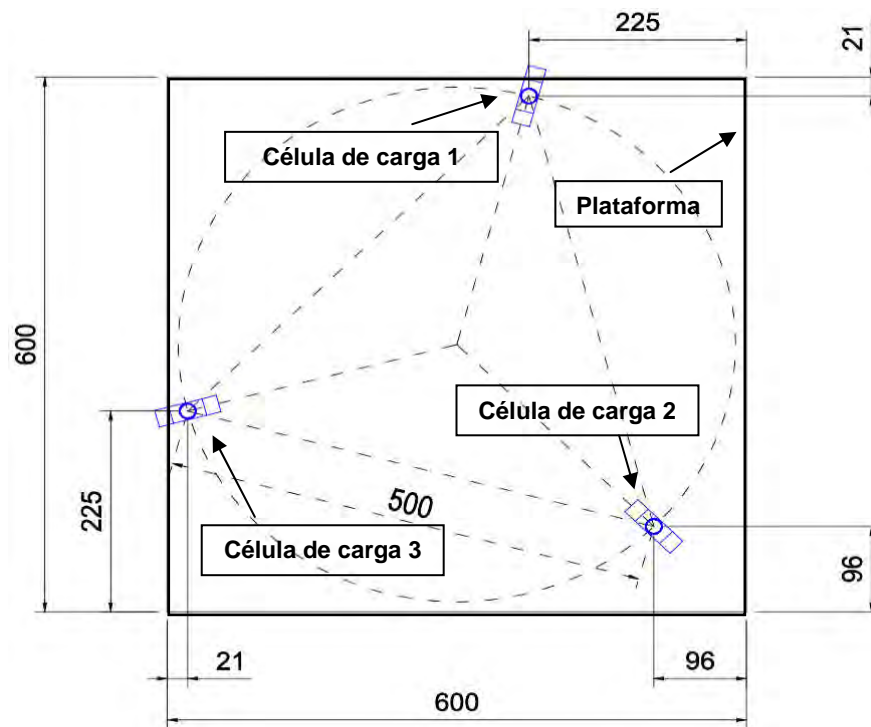


Figura 40 - Croqui de posicionamento das células de carga

O acelerômetro, para ser utilizado nos ensaios, foi aparafusado em um bloco cúbico de alumínio com aresta de 20mm com furos M2, colado em uma placa de alumínio com dimensões de 150mm x 100mm x 5mm. Com o objetivo de prender a placa de alumínio ao corpo de cada pessoa, foram utilizados conectores (Velcros®) do tipo “loop” e “hook”, com 25mm de largura. O acelerômetro foi posicionado o mais próximo possível do centro de gravidade de cada pessoa. As Figuras 41 e 42 mostram o esquema do posicionamento do acelerômetro acoplado na pessoa.



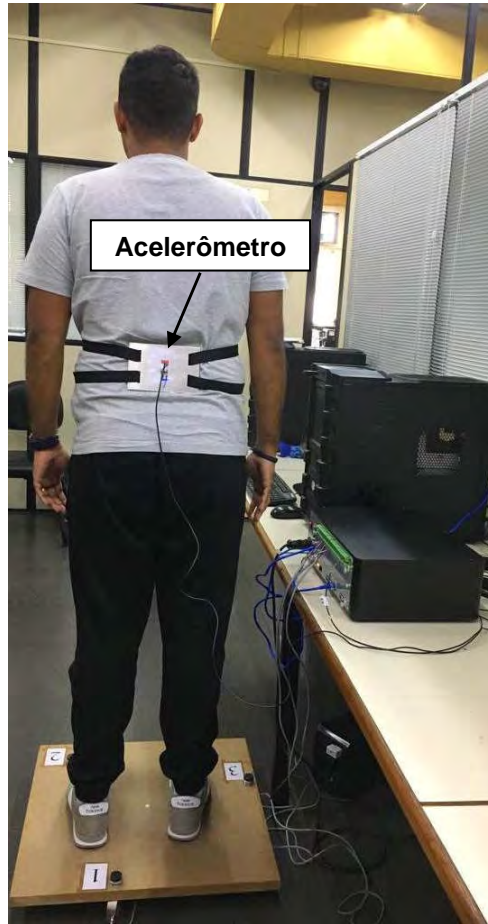


Figura 41 - Posicionamento do acelerômetro acoplado a pessoa

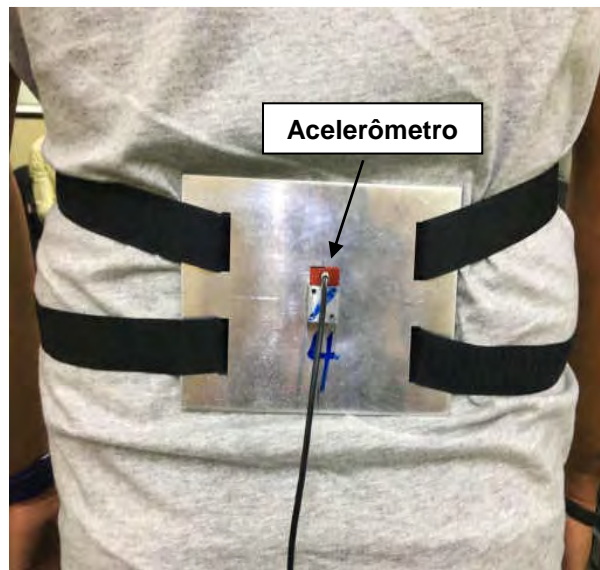


Figura 42 - Detalhe típico do acelerômetro acoplado a pessoa

As calibrações das três células de carga e do acelerômetro foram realizadas para que os valores obtidos durante os ensaios simulassem com a menor margem de erro possível os valores de aceleração e força de cada salto. Cabe ressaltar que, o somatório dos valores de força encontrados em cada uma das células de carga corresponde ao valor da força que a pessoa exerce sobre a estrutura.

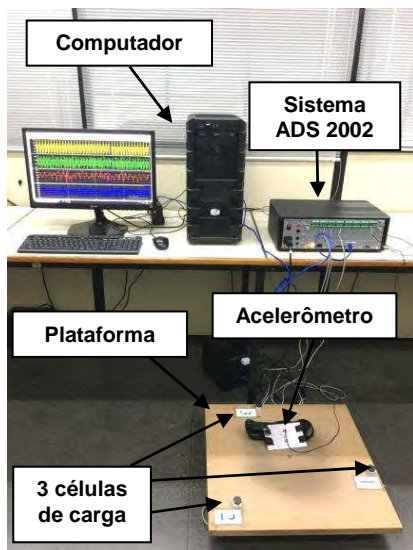
Um metrônomo foi utilizado para garantir que os ensaios fossem realizados na frequência de 2,20Hz, que equivale a 132bpm, onde cada “batida” sonora equivale ao contato da pessoa sobre a estrutura.

Cem pessoas foram selecionadas para a realização dos ensaios experimentais. Todas elas receberam instruções de saltar o mais próximo possível do centro de gravidade da estrutura, no ritmo da “batida” emitida pelo metrônomo. Cada pessoa participante passou por um processo de pesagem com a utilização de uma balança digital (Figura 43).



Figura 43 - Balança digital

Durante os ensaios, um sistema de aquisição de dados ADS 2002 registrou as medições da aceleração no centro de gravidade da pessoa e da força aplicada sobre a plataforma de MDF. As Figuras 44 a 46 apresentam as etapas dos ensaios realizados de três participantes.



a) 1º etapa: Estrutura vazia



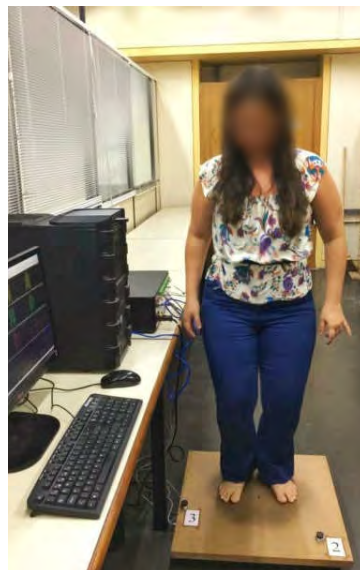
b) 2º etapa: Pessoa inicialmente parada



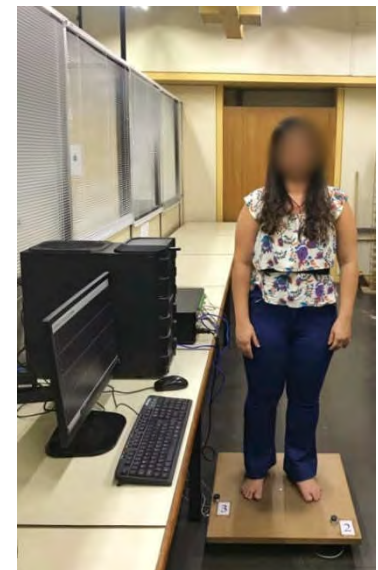
c) 3º etapa: Pessoa flexionando os joelhos para preparar o salto



d) 4º etapa: Pessoa realizando o salto

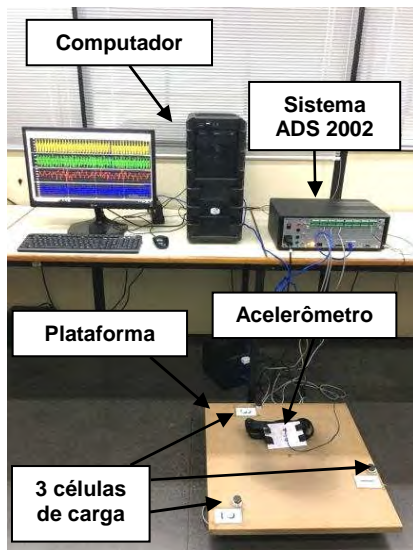


e) 5º etapa: Pessoa flexionando os joelhos na aterrissagem sobre a plataforma e seguidamente se preparando para o próximo salto (4º etapa)



f) 6º etapa: Término do ensaio

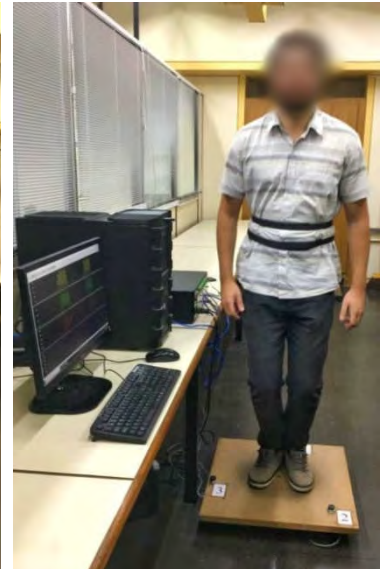
Figura 44 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 55 (m=81,85kg)



a) 1º etapa: Estrutura vazia



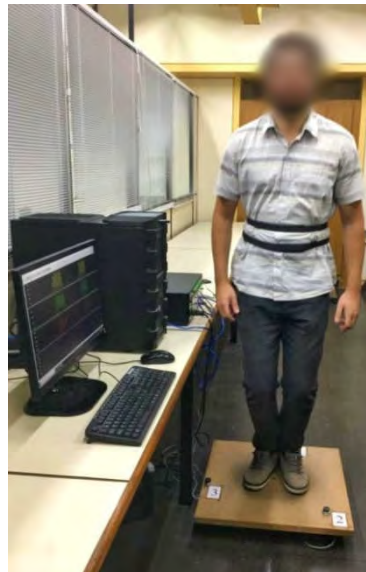
b) 2º etapa: Pessoa inicialmente parada



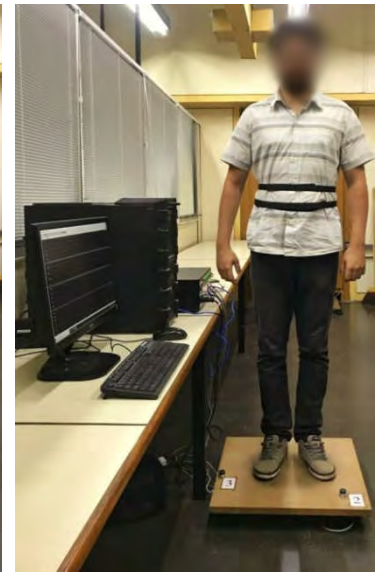
c) 3º etapa: Pessoa flexionando os joelhos para preparar o salto



d) 4º etapa: Pessoa realizando o salto

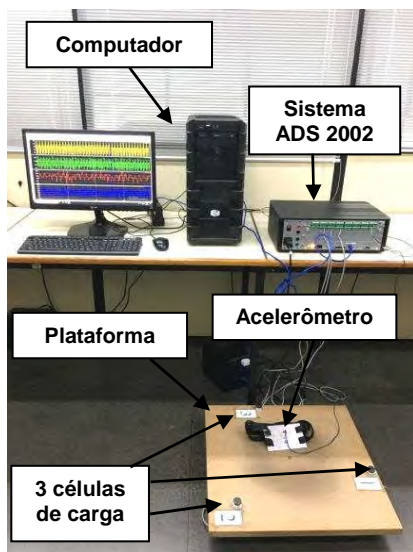


e) 5º etapa: Pessoa flexionando os joelhos na aterrissagem sobre a plataforma e seguidamente se preparando para o próximo salto (4º etapa)



f) 6º etapa: Término do ensaio

Figura 45 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 61 ( $m=88,65\text{kg}$ )



a) 1º etapa: Estrutura vazia



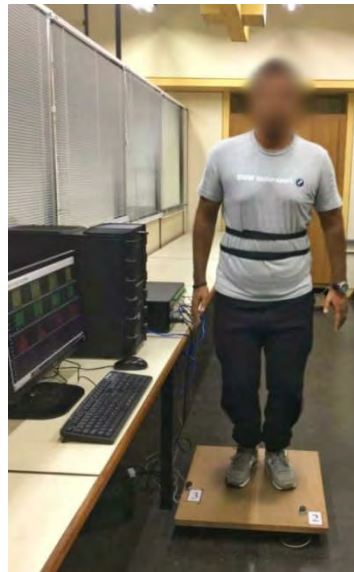
b) 2º etapa: Pessoa inicialmente parada



c) 3º etapa: Pessoa flexionando os joelhos para preparar o salto



d) 4º etapa: Pessoa realizando o salto



e) 5º etapa: Pessoa flexionando os joelhos na aterrissagem sobre a plataforma e seguidamente se preparando para o próximo salto (4º etapa)



f) 6º etapa: Término do ensaio

Figura 46 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 94 (m=91,95kg)

## 2.2 Equipamentos utilizados nos ensaios

As três células de carga utilizadas nos ensaios são do modelo CSR-1000, fabricadas pela MK Controle, onde cada célula de carga possui sensibilidade de 2mV/V e capacidade de 10kN. A Figura 47 ilustra as células de carga utilizadas no presente trabalho de pesquisa.

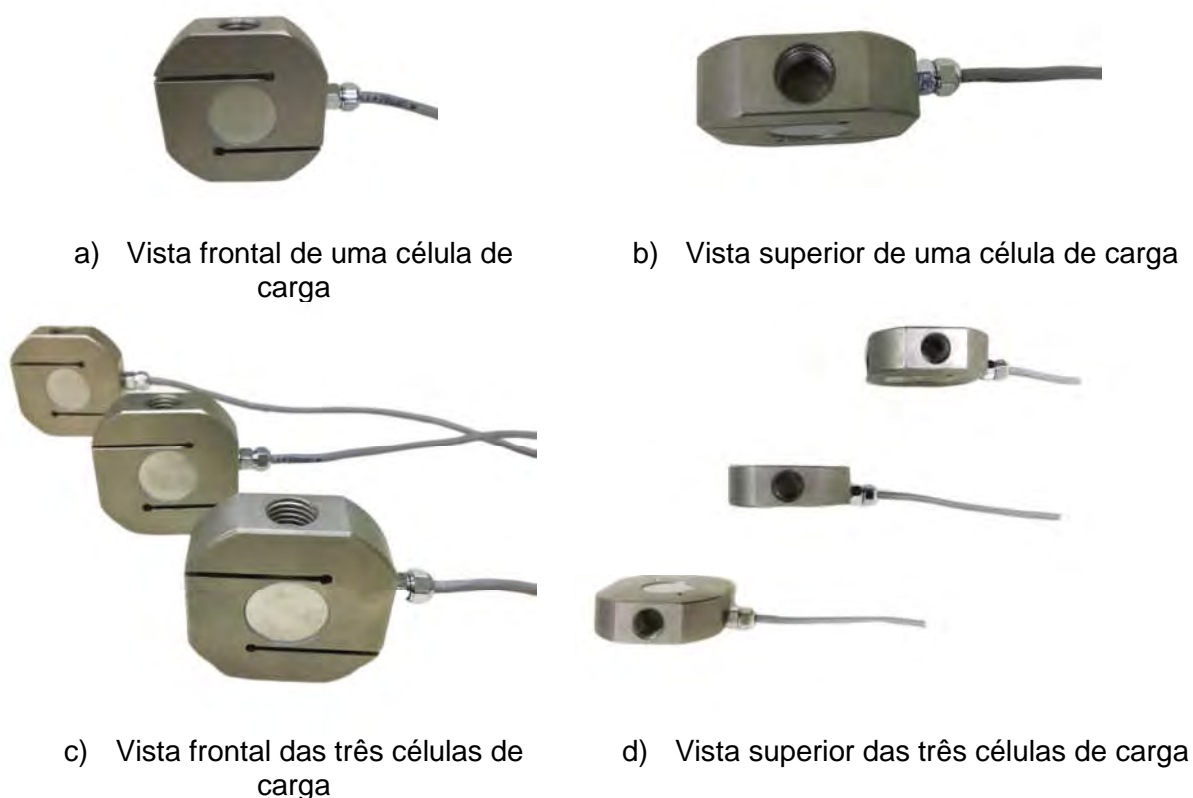


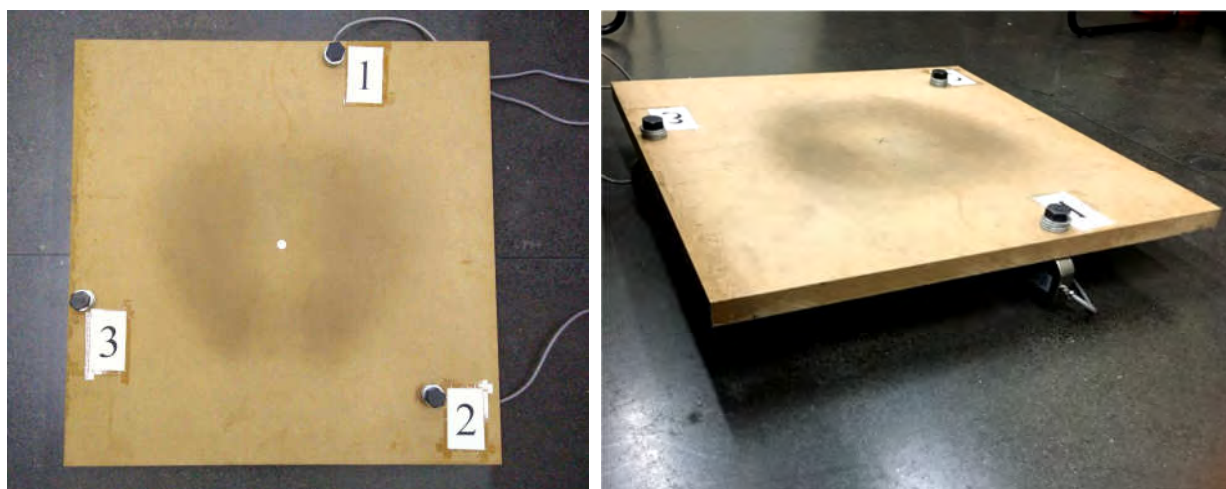
Figura 47 - Células de carga

O acelerômetro utilizado nos ensaios é da marca Dytran, que é um acelerômetro capacitivo. A Figura 48 apresenta um modelo típico do acelerômetro Dytran. O funcionamento básico do referido acelerômetro está relacionado com a capacitância variável do circuito em função da oscilação.



a) Vista superior do acelerômetro      b) Vista dos conectores do acelerômetro  
 Figura 48 - Acelerômetro Dytran

A Figura 49 apresenta a plataforma de MDF com as três células de carga acopladas. Conforme já mencionado na seção 2.1, a plataforma apresenta dimensões de 600mm x 600mm x 25mm, possuindo uma massa de 6,4kg e uma área de 0,36m<sup>2</sup>.



a) Vista superior da plataforma      b) Vista em perspectiva da plataforma  
 Figura 49 - Placa de MDF utilizada nos ensaios

Uma análise modal da plataforma foi realizada com o objetivo de se avaliar as frequências naturais da estrutura, para assim obter uma indicação de como será o comportamento da mesma frente à atuação de um carregamento. Primeiramente a referida análise foi realizada de forma numérica, mediante o emprego do programa computacional ANSYS (2009), onde se obteve o valor de 62,3Hz para a primeira frequência natural da plataforma. Posteriormente, foi realizada uma análise modal experimental através da utilização de um aplicativo denominado “Sound Analyser

Free”, de tal forma que a primeira frequência natural experimental encontrada foi igual a 62,2Hz, que é um valor muito próximo ao valor encontrado numericamente. Verifica-se através destes valores encontrados que a plataforma de MDF apresenta um valor de frequência fundamental elevado, o que a caracteriza por ser uma estrutura rígida e, como descrito anteriormente na seção 2.1, este fato faz com que sua frequência natural não interaja com a frequência proveniente da ação dinâmica humana. As Figuras 50 e 51 ilustram os resultados encontrados.

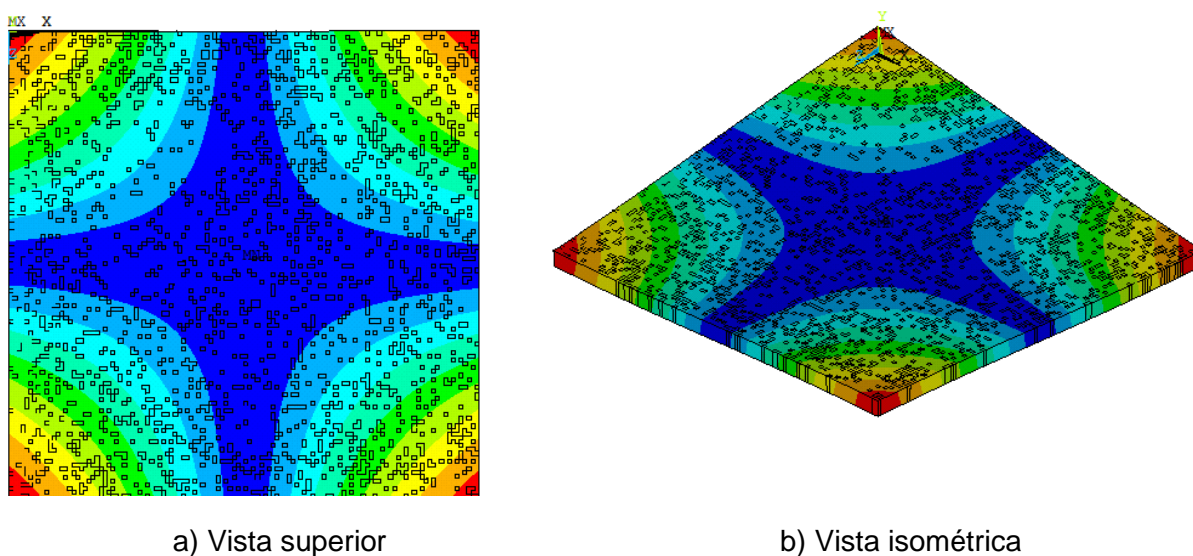


Figura 50 - 1º modo de vibração da plataforma via análise experimental ( $f_{01}=62,3\text{Hz}$ )



Figura 51 - Frequências da plataforma via análise numérica ( $f_{01}=62,2\text{Hz}$ )



Um aplicativo metrônomo foi utilizado para controlar o salto das pessoas sobre a plataforma. A unidade deste dispositivo é o “bpm” (batidas por minuto), e cada “batida” sonora equivale ao contato da pessoa sobre a estrutura. O valor ajustado no metrônomo foi fixado em 132bpm ( $f=2,20\text{Hz}$ ). A Figura 52 ilustra o metrônomo utilizado nos ensaios.

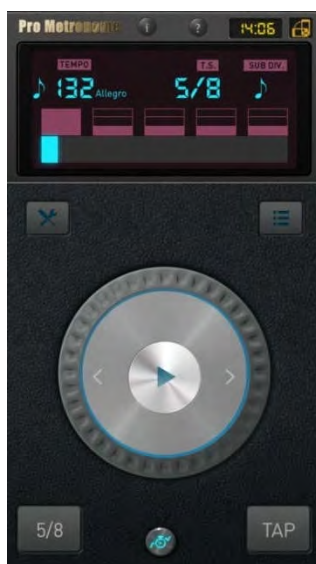


Figura 52 - Aplicativo metrônomo

Os dados obtidos durante a prática da atividade rítmica (torcida) foram registrados pelo sistema de aquisição de dados ADS 2002, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA. Este equipamento é constituído por uma placa controladora (driver) AC2122 VB que suporta o barramento ADS 200. Neste barramento está conectada a placa condicionadora de sinais AI2164, que possui dezesseis canais. O equipamento é acionado por computador, via conexão Ethernet, que controla a aquisição e a análise dos sinais.

Este sistema de aquisição de dados é baseado em condicionadores de sinais, que transformam o sinal da variação elétrica em valor de engenharia (força, aceleração, etc.), controlados por um computador. Inicialmente, os sensores ou transdutores (acelerômetros, células de carga e termopar) são conectados, por meio de cabos, à placa condicionadora de sinais integradas no equipamento ADS 2002. Os sinais de entrada (aceleração e força ao longo do tempo) são obtidos através do software AqDados, e são modificados por meio da placa condicionadora, através de processos como amplificação ou atenuação, conversão de corrente para tensão e

filtragem. Posteriormente, no software AqDAnalysis é realizada a análise dos sinais armazenados, permitindo a visualização do sinal nos domínios do tempo e da frequência, tanto na forma gráfica quanto na forma de tabela de dados dos arquivos. Os softwares AqDados e AqDAnalysis também foram fornecidos pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA.

As Figuras 53 e 54 ilustram o sistema de aquisição de dados ADS2002, enquanto as Figuras 55 e 56 mostram, respectivamente, as telas dos softwares AqDados e AqDAnalysis.

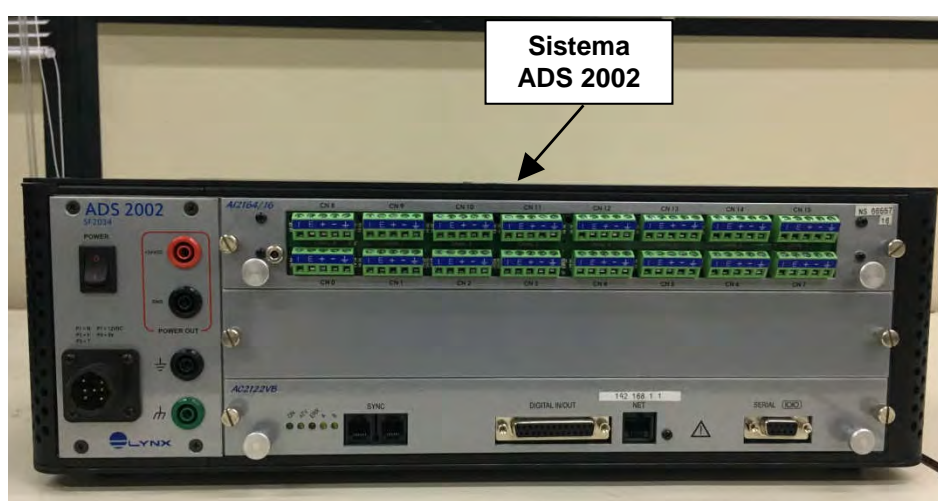


Figura 53 - Sistema de aquisição de dados ADS 2002

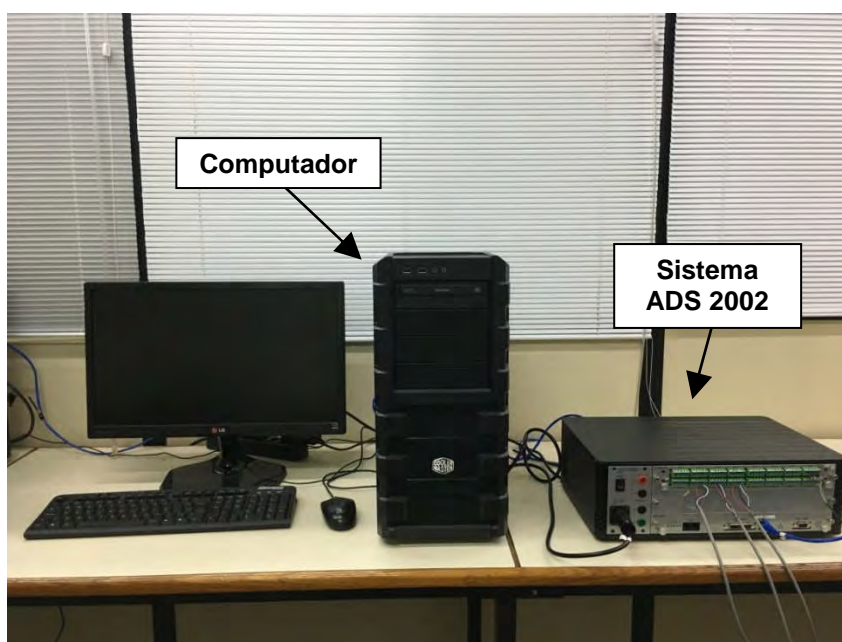


Figura 54 - Sistema de aquisição de dados ADS 2002 acoplado ao computador

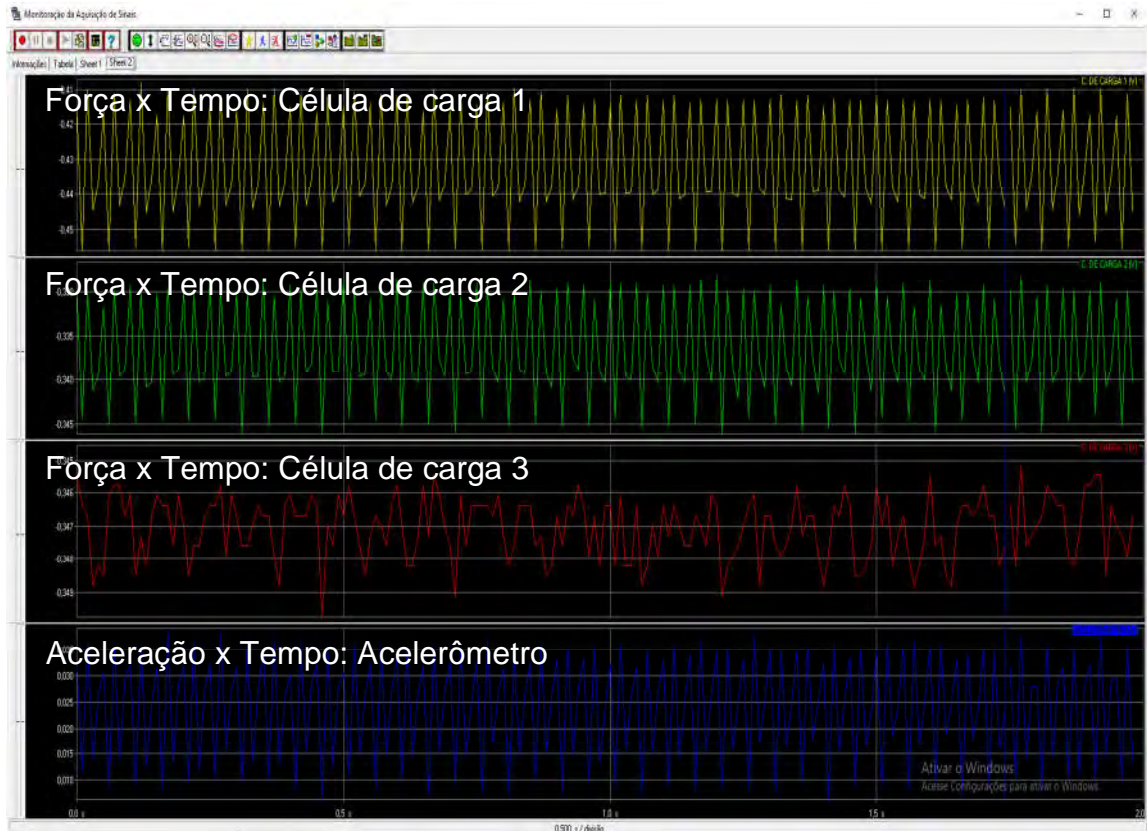


Figura 55 - Software AqDados

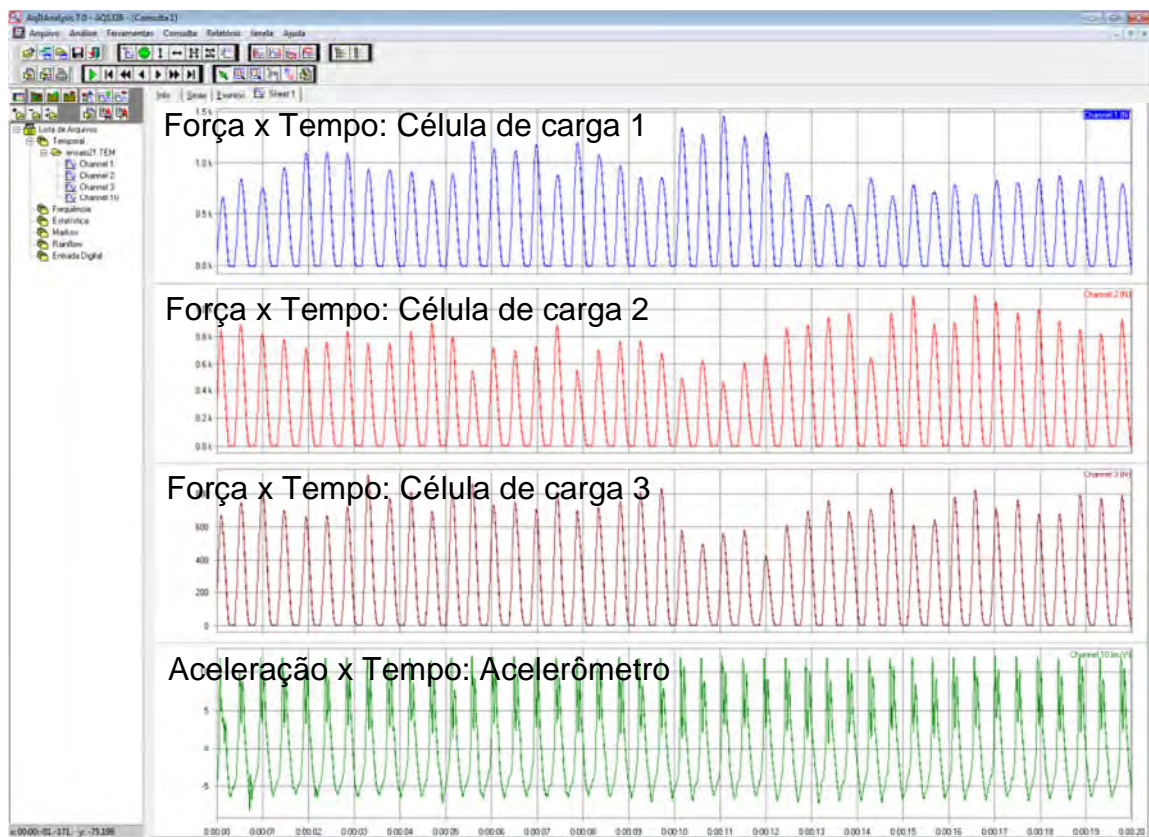
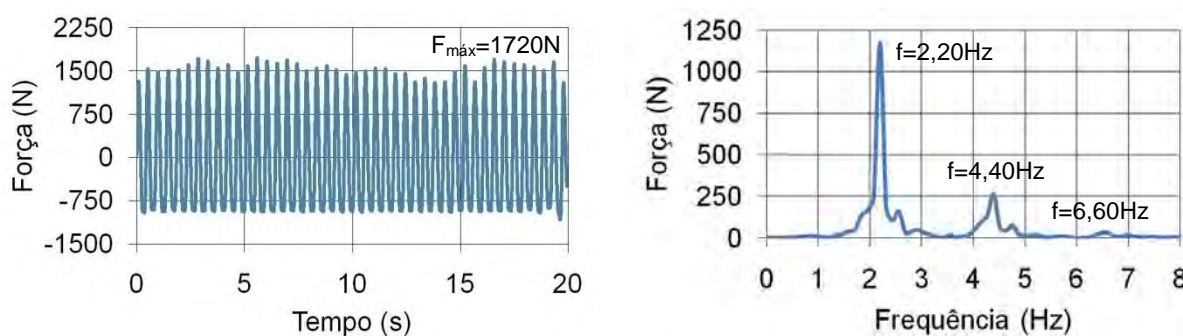


Figura 56 - Software AqDAnalysis

### 2.3 Respostas dinâmicas obtidas nos testes experimentais

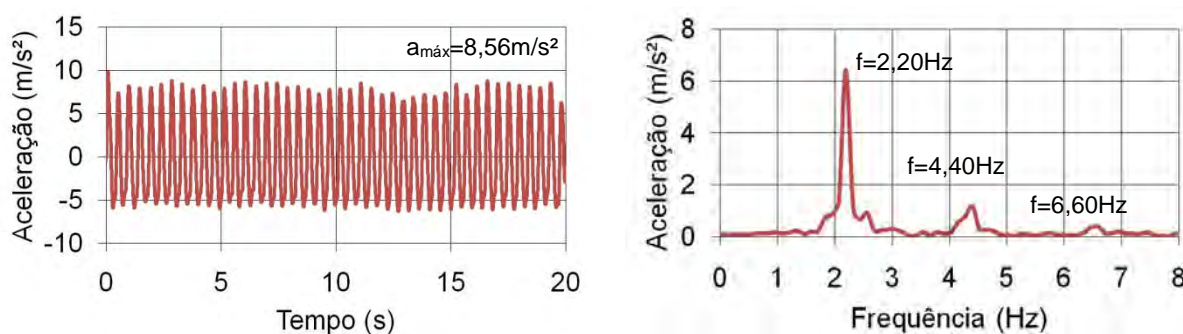
As respostas dinâmicas obtidas nos ensaios experimentais estão apresentadas nas Figuras 57 a 76 que ilustram os gráficos de força, aceleração, velocidade e deslocamento nos domínios do tempo e da frequência de 5 (Cinco) das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios experimentais. Destaca-se que os valores de força e também as acelerações foram coletadas experimentalmente, enquanto a velocidade e o deslocamento foram obtidos via integração do sinal experimental da aceleração, através da utilização do programa MATLAB (2017). Cabe ressaltar que filtros do tipo “passa-alta” e “passa-baixa” foram utilizados para a filtragem dos sinais das forças, acelerações, velocidades e deslocamentos, com o objetivo de eliminar ruídos indesejados [ $0,5\text{Hz} < f_s < 8\text{Hz}$ ;  $f_s$ : frequência do sinal].



a) Domínio do tempo

b) Domínio da frequência

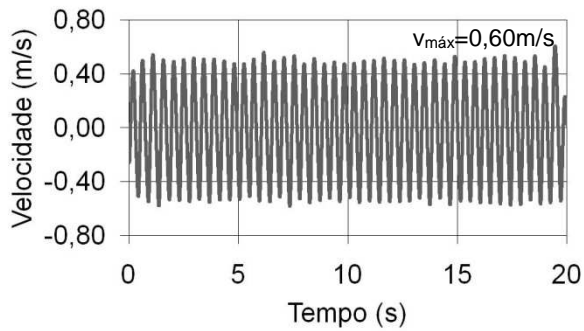
Figura 57 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 1 ( $m=92,70\text{kg}$ )



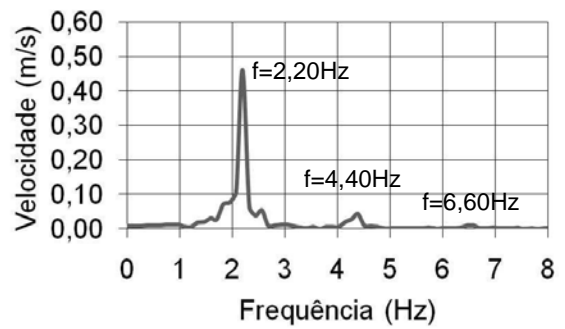
a) Domínio do tempo

b) Domínio da frequência

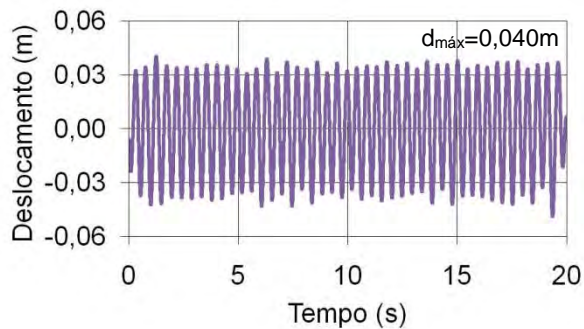
Figura 58 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 1 ( $m=92,70\text{kg}$ )



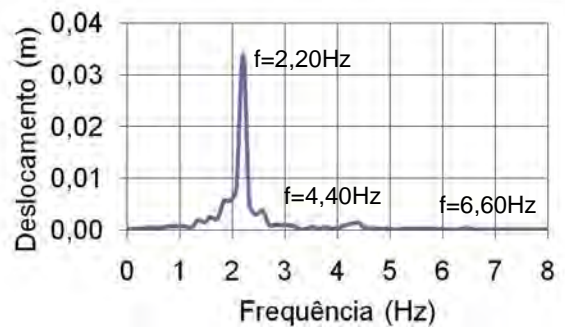
a) Domínio do tempo



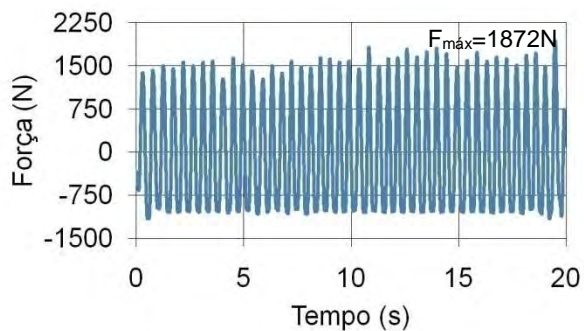
b) Domínio da frequência

Figura 59 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 1 ( $m=92,70\text{kg}$ )

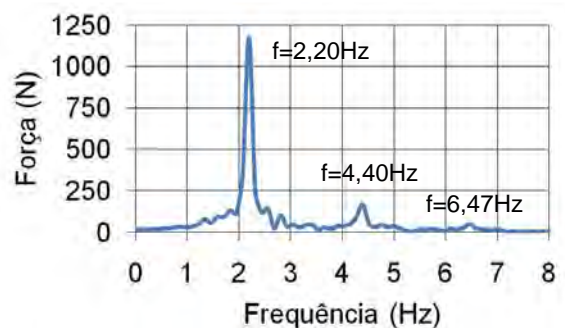
a) Domínio do tempo



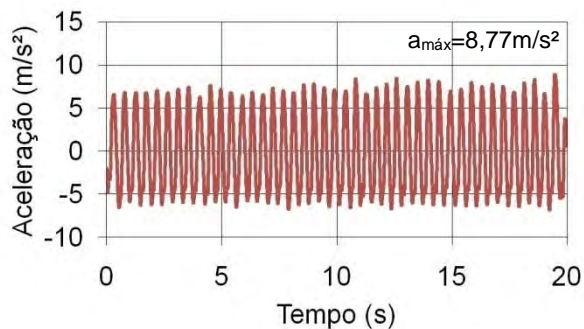
b) Domínio da frequência

Figura 60 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 1 ( $m=92,70\text{kg}$ )

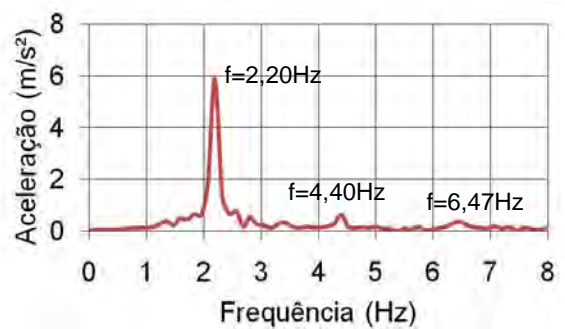
a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

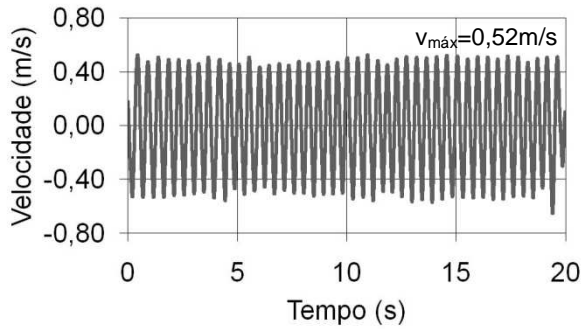
Figura 61 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 4 ( $m=103,20\text{kg}$ )

a) Domínio do tempo

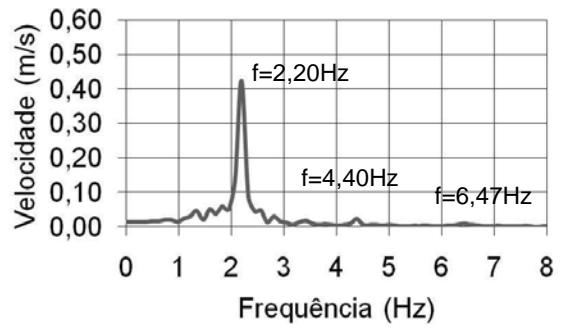


b) Domínio da frequência

Figura 62 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 4 ( $m=103,20\text{kg}$ )

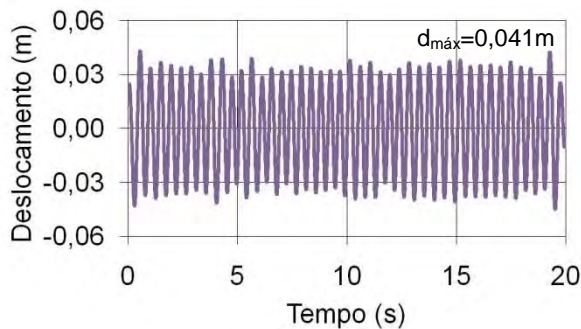


a) Domínio do tempo

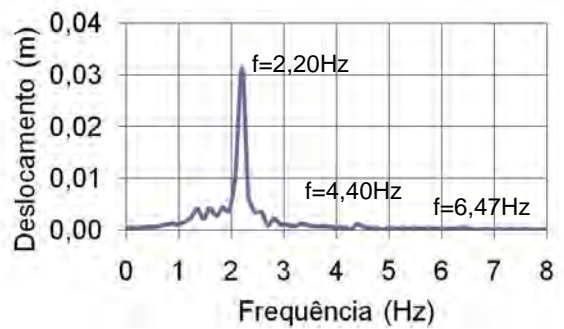


b) Domínio da frequência

Figura 63 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 4 ( $m=103,20\text{kg}$ )

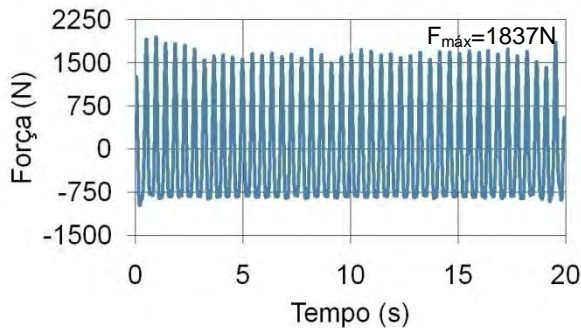


a) Domínio do tempo

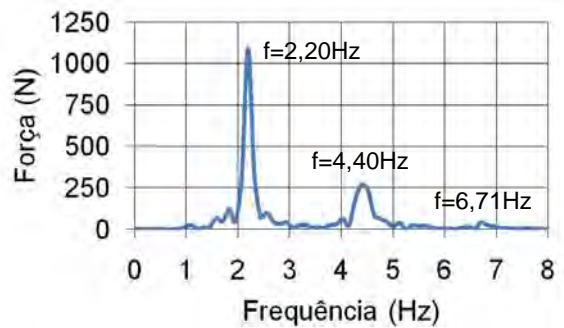


b) Domínio da frequência

Figura 64 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 4 ( $m=103,20\text{kg}$ )

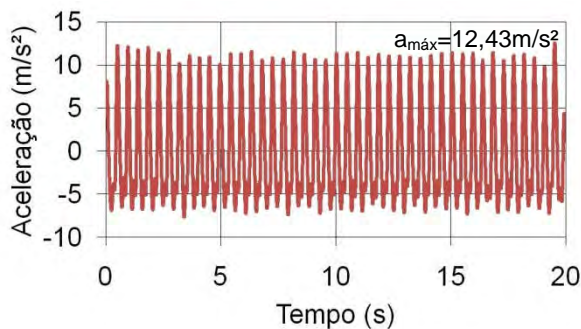


a) Domínio do tempo

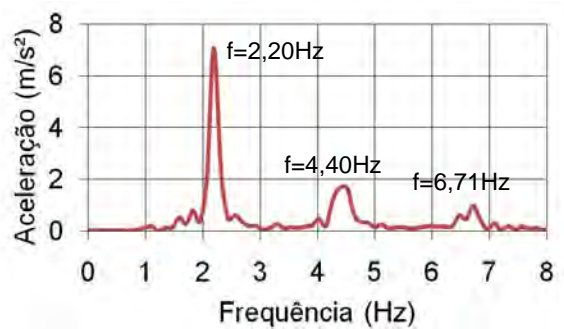


b) Domínio da frequência

Figura 65 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 7 ( $m=82,65\text{kg}$ )

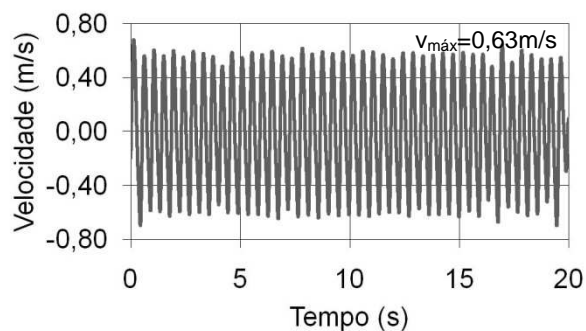


a) Domínio do tempo

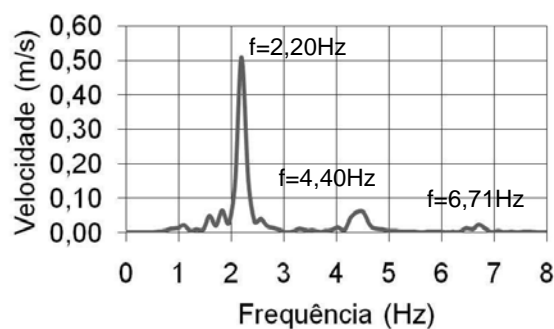


b) Domínio da frequência

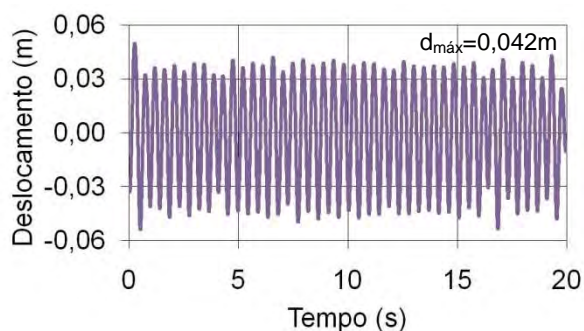
Figura 66 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 7 ( $m=82,65\text{kg}$ )



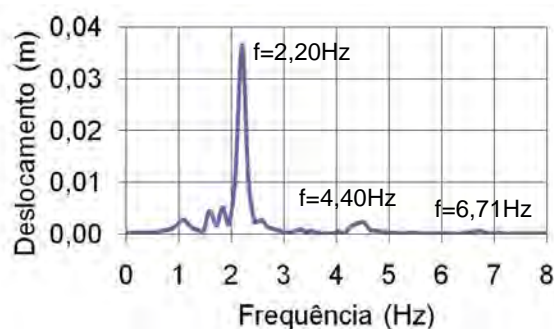
a) Domínio do tempo



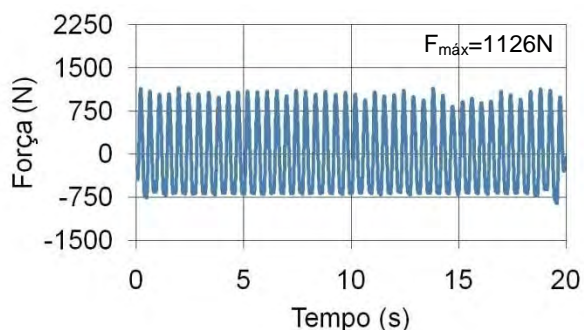
b) Domínio da frequência

Figura 67 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 7 ( $m=82,65\text{kg}$ )

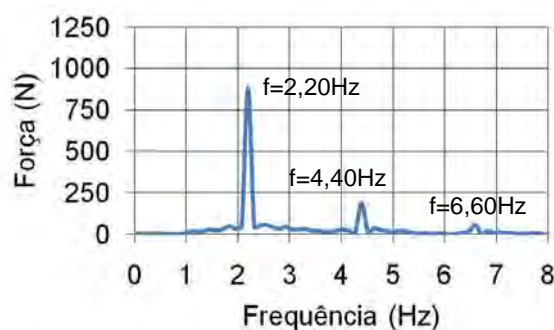
a) Domínio do tempo



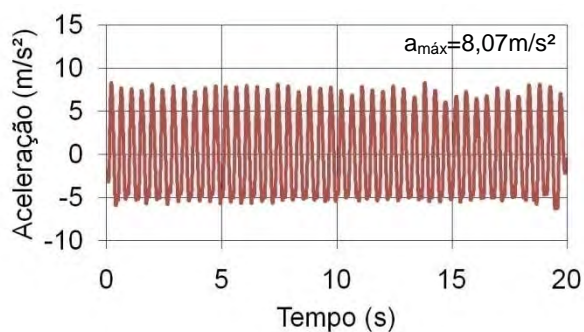
b) Domínio da frequência

Figura 68 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 7 ( $m=82,65\text{kg}$ )

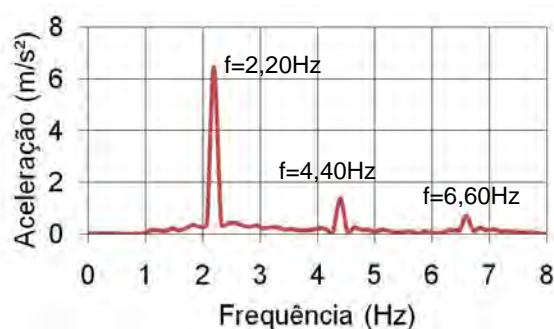
a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

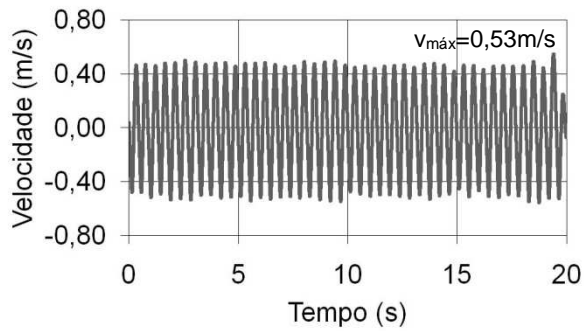
Figura 69 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 10 ( $m=68\text{kg}$ )

a) Domínio do tempo

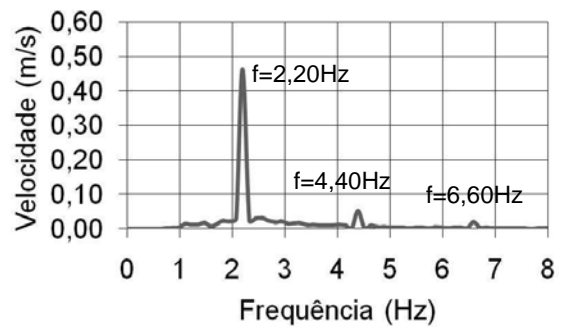


b) Domínio da frequência

Figura 70 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 10 ( $m=68\text{kg}$ )

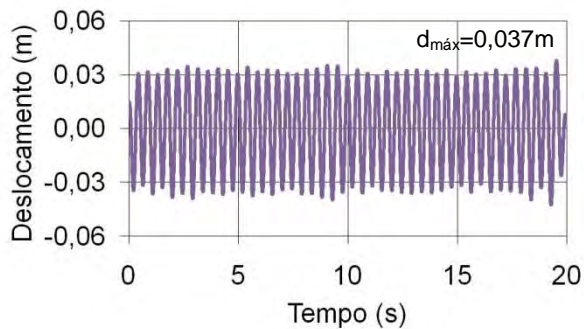


a) Domínio do tempo

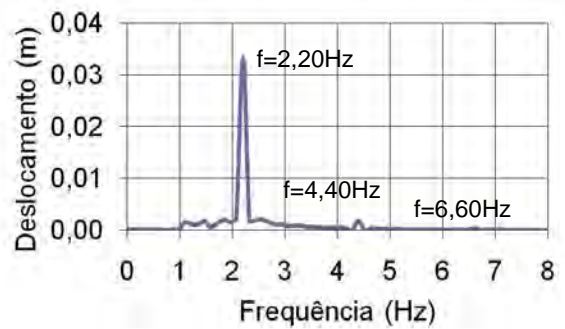


b) Domínio da frequência

Figura 71 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 10 (m=68kg)

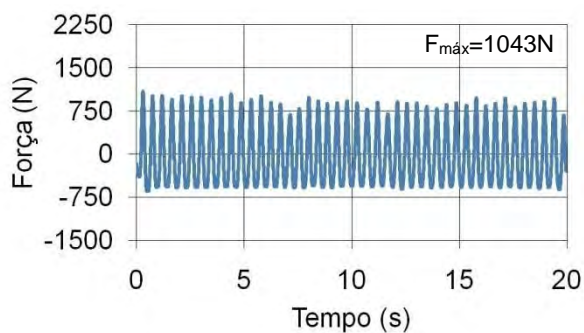


a) Domínio do tempo

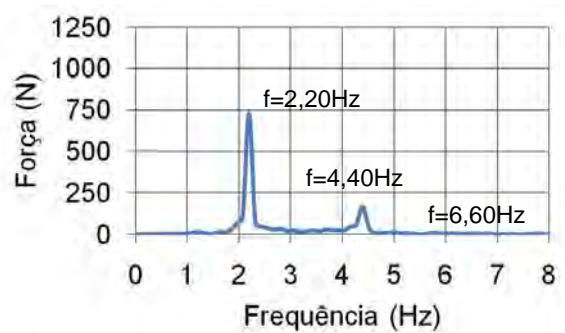


b) Domínio da frequência

Figura 72 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 10 (m=68kg)

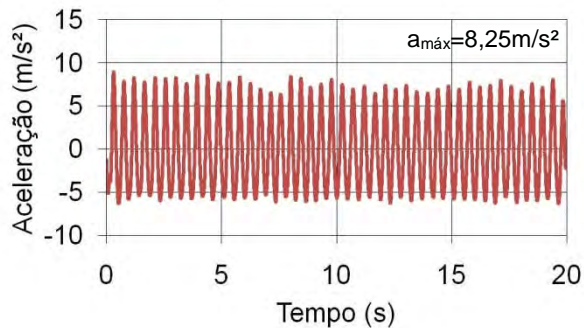


a) Domínio do tempo

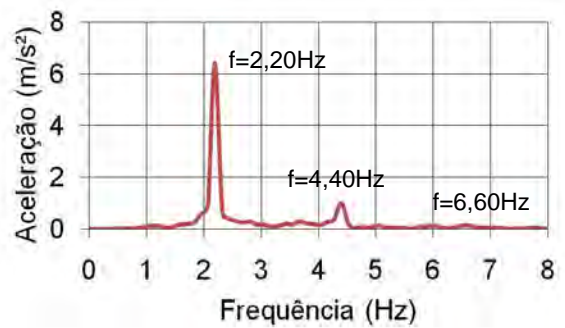


b) Domínio da frequência

Figura 73 - Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 16 (m=59,70kg)



a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

Figura 74 - Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 16 (m=59,70kg)



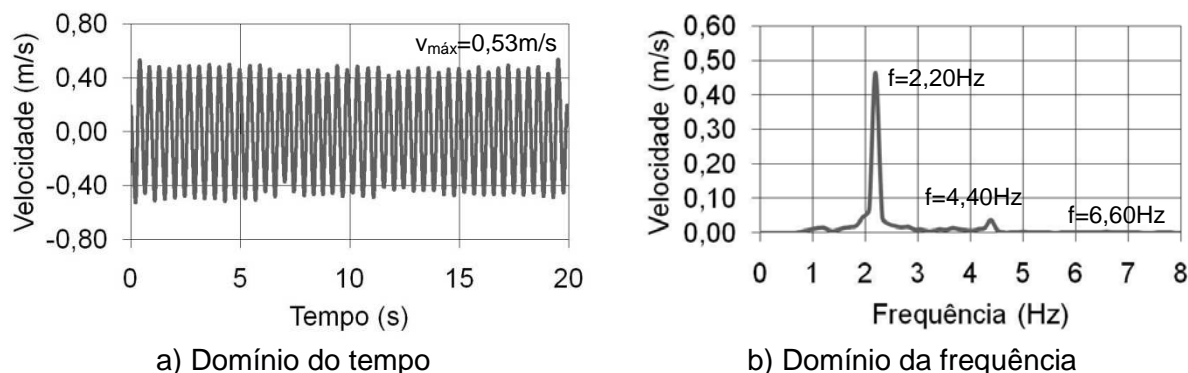


Figura 75 - Velocidade: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 16 ( $m=59,70\text{kg}$ )

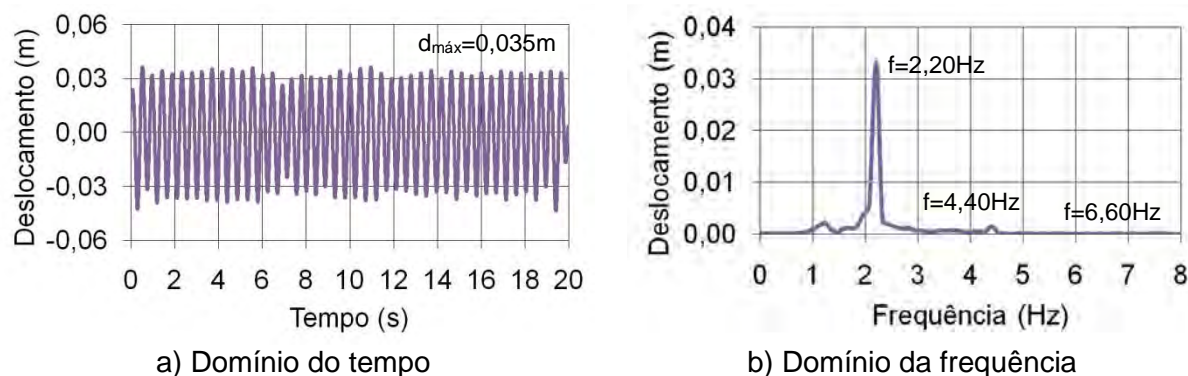


Figura 76 - Deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 16 ( $m=59,70\text{kg}$ )

Avaliando os gráficos presentes nas Figuras 57 a 76, pode-se verificar que a força exercida sobre a plataforma, além dos valores obtidos de aceleração, velocidade e deslocamento, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, apresentam uma variação de pessoa para pessoa. Esta variação ocorre em virtude da diferença do peso, da idade, da habilidade física, do tipo de calçado e da forma que cada pessoa pratica a atividade humana rítmica (torcida). Por exemplo, ao se comparar a pessoa 4 (Figuras 61 a 64), que possui massa de  $103,20\text{kg}$ , com a pessoa 16 (Figuras 73 a 76), que possui massa de  $59,70\text{kg}$ , nota-se que a pessoa 4 apresenta valores de força, aceleração, velocidade e deslocamento significativamente mais elevados.

Com relação aos gráficos no domínio da frequência (Figuras 57b a 76b), verifica-se que os picos onde ocorrem as maiores transferências de energia do sistema correspondem, principalmente, aos três harmônicos relacionados à atividade humana rítmica (torcida) praticada ( $f_{01}=2,20\text{Hz}$ ,  $f_{02}=4,40\text{Hz}$  e  $f_{03}=6,60\text{Hz}$ ).

## 2.4 Considerações do capítulo

O presente capítulo teve como objetivo apresentar uma descrição detalhada dos ensaios experimentais realizados no Laboratório de Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ (PGECIV/FEN/UERJ), assim como apresentar as características de todos os equipamentos que foram necessários para o desenvolvimento dos testes. Por fim, foram divulgados espectros relacionados à força, aceleração, velocidade e deslocamento, no domínio do tempo e da frequência de 5 (cinco) das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios experimentais, com o objetivo de exemplificar as respostas dinâmicas obtidas.

### 3 MODELAGEM DOS SISTEMAS BIODINÂMICOS

O modelo biodinâmico do carregamento representa uma forma mais realista de modelagem da ação dinâmica representativa das pessoas (torcida), em relação à modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força dura”), que é a maneira mais usual utilizada para a análise dinâmica de sistemas estruturais. Nesse contexto, cabe ressaltar que a modelagem biodinâmica considera a interação dinâmica indivíduo-estrutura, através do emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor para representar dinamicamente o corpo humano, levando em consideração que as características dinâmicas humanas (massa, rigidez e amortecimento) estão atuando sobre os sistemas estruturais.

Estudos recentes confirmam a afirmativa que a modelagem biodinâmica tem se mostrado como uma maneira mais realista e econômica de se considerar as ações dinâmicas humanas (CAMPISTA; SILVA, 2018a; CAPPELLINI, 2015; DA SILVA et al., 2013; JOINT WORKING GROUP, 2008; JONES et al., 2011; SHAHABPOOR; PAVIC; RACIC, 2016; TOSO et al., 2016; VAN NIMMEN, 2015). Os modelos biodinâmicos podem representar uma pessoa parada, em pé ou sentada; pessoas pulando; e pessoas correndo.

Neste capítulo é proposto um modelo biodinâmico para representar a ação dinâmica humana proveniente das pessoas (torcida), onde a determinação das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) foi realizada a partir da resolução matemática de um problema clássico de otimização, através da utilização de Algoritmos Genéticos (AG), via uso do programa MATLAB (2017), tomando como base os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados, que estão descritos no capítulo 2.

#### 3.1 Modelagem biodinâmica proposta

A modelagem biodinâmica proposta no presente trabalho considera o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL) para simular numericamente a interação dinâmica indivíduo-estrutura. A escolha deste modelo encontra-se alinhada aos modelos propostos por Campista e Silva (2018a) e Campista e Silva (2017).

Na modelagem proposta, os valores de aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo obtidos provenientes do carregamento humano foram aplicados sobre o grau de liberdade da massa do sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), enquanto os valores de força no domínio do tempo foram aplicados diretamente sobre o sistema estrutural. É importante enfatizar que os valores da força, aceleração, velocidade e deslocamento das pessoas foram obtidos com base nos testes experimentais descritos no capítulo 2. As Figuras 77 e 78 ilustram representações genéricas acerca da modelagem dos sistemas biodinâmicos.

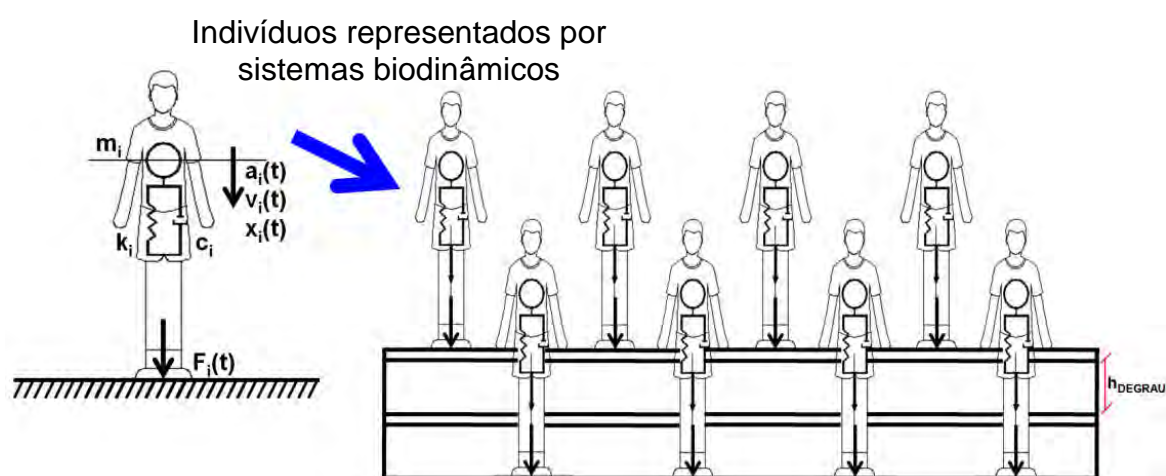


Figura 77 - Representação genérica dos indivíduos representados por sistemas biodinâmicos com 1GL

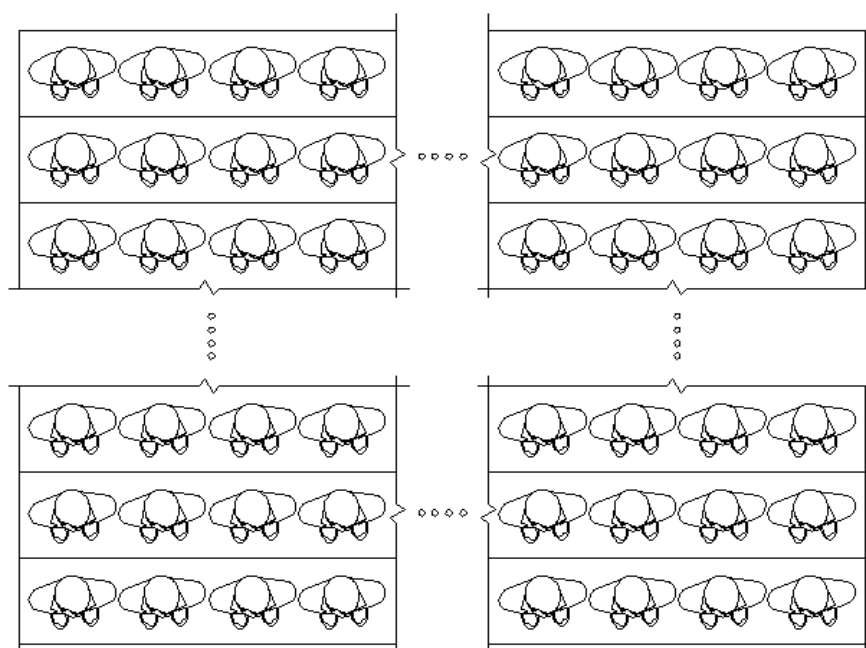


Figura 78 - Vista superior da representação genérica dos indivíduos representados por sistemas biodinâmicos com 1GL

Com o objetivo de se validar os valores de aceleração encontrados sobre a plataforma durante a realização dos ensaios experimentais, foi desenvolvido um modelo numérico-computacional da referida plataforma para assim ser possível a realização de uma análise numérica, através do emprego do programa ANSYS (2009), o que permitiu a obtenção dos valores de aceleração sobre a plataforma de forma numérica.

A análise numérica da plataforma levou em consideração a aplicação do carregamento do ser humano sendo modelado através de um sistema biodinâmico, com um grau de liberdade (S1GL). A Figura 79 ilustra a modelagem do ser humano sobre a plataforma, enquanto a Figura 80 divulga os gráficos da aceleração no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, que comparam os resultados obtidos através do modelo experimental e do modelo numérico-computacional.

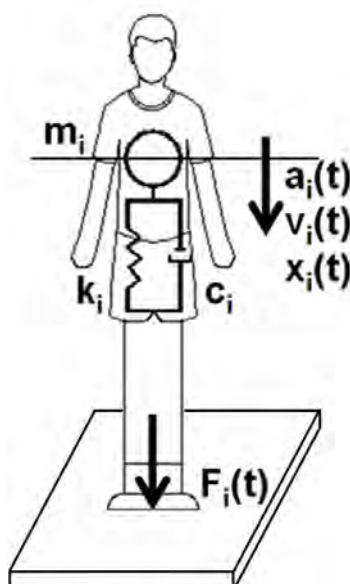
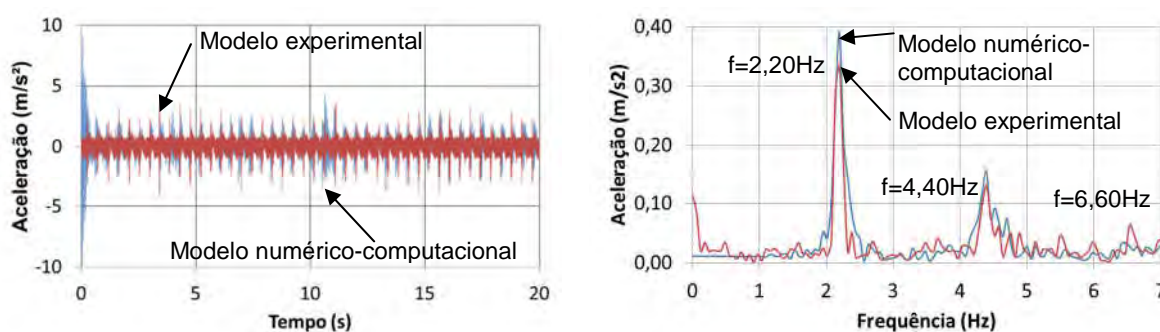


Figura 79 - Representação do ser humano sobre a plataforma



a) Domínio do tempo

b) Domínio da frequência

Figura 80 - Comparação: modelo numérico x modelo numérico computacional

A partir dos gráficos presentes na Figura 80 verifica-se que existe uma boa aproximação entre a resposta dinâmica obtida experimentalmente e a obtida através da modelagem numérico-computacional, o que leva a conclusão que o modelo biodinâmico proposto para representar o carregamento dinâmico proveniente do ser humano durante a prática da atividade humana rítmica fornece resultados que se encontram calibrados com os resultados obtidos experimentalmente, validando assim a sua utilização.

### 3.2 Determinação das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos

As características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) podem sofrer variações em função de alguns fatores, como por exemplo, do tipo da atividade humana rítmica praticada, do tempo que as pessoas permanecem em contato com a estrutura durante a prática da atividade, da quantidade de pessoas que estão praticando a atividade, além do tipo de estrutura onde a atividade está sendo praticada.

Com base nos resultados provenientes dos ensaios experimentais realizados, as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos foram determinadas a partir da realização de um processo de otimização, mediante a utilização de Algoritmos Genéticos (AG).

Os Algoritmos Genéticos consistem no uso da teoria clássica da evolução natural, que se baseia na seleção de “indivíduos” de uma determinada população, de forma aleatória, escolhidos como “pais”, de maneira a gerarem “filhos” para uma próxima “geração”.

O Algoritmo Genético é uma metodologia de otimização global que visa a resolução de problemas, inventado por John Holland em meados de 1960, e desenvolvido por Holland, colegas e estudantes na Universidade de Michigan entre 1960 e 1970. Em 1975, Holland publicou um artigo denominado "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*", baseado no ponto inicial dos Algoritmos Genéticos.

Esta metodologia é uma família de técnicas de busca estocásticas fundamentada na teoria da evolução de Darwin (Dianati et al., 2002), que tem como objetivo a obtenção da melhor solução possível do problema de otimização a ser

resolvido. Processos naturais de sobrevivência e reprodução das populações, essenciais em sua evolução são simulados com este objetivo. Conseqüentemente, os indivíduos mais adaptados sobrevivem mais tempo ao meio em que habitam, além de terem maior probabilidade de reprodução e perpetuação de seus códigos genéticos (cromossomos) para as próximas gerações. Segundo Pacheco et al. (1999), estes princípios são imitados na construção de algoritmos computacionais, buscando uma melhor solução para um determinado problema por meio da evolução de populações de soluções codificadas através de cromossomos artificiais.

O método de otimização via Algoritmo Genético é desenvolvido em quatro etapas. A primeira baseia-se na determinação de um conjunto aleatório de soluções iniciais, chamado população. Cada indivíduo que está inserido nessa população é denominado cromossomo e representa uma possível solução para o problema. Em seguida, na segunda etapa ocorre a avaliação dos cromossomos através da função de adaptabilidade, com base na função objetivo, de modo que cada cromossomo recebe um valor de adaptabilidade que reflete sua qualidade para resolução do problema. Na terceira etapa, através de uma "seleção", escolhem-se os indivíduos com os maiores valores da função adaptabilidade como base para a criação de um novo conjunto de possíveis soluções (população), surgindo uma nova "geração". Por fim, na última etapa são formados os novos cromossomos por meio do cruzamento entre dois cromossomos da mesma geração (crossover) e modificações de um cromossomo (mutação), além da consideração de uma taxa referente ao elitismo. Deste modo, o processo evolucionário do cromossomo cessará após atingir a melhor solução satisfatória do problema, por meio de um critério de parada. Neste sentido, verifica-se que é possível fazer uma analogia entre o algoritmo genético e os princípios da evolução das espécies segundo Darwin. A Figura 81 ilustra o desenvolvimento das quatro etapas descritas anteriormente.

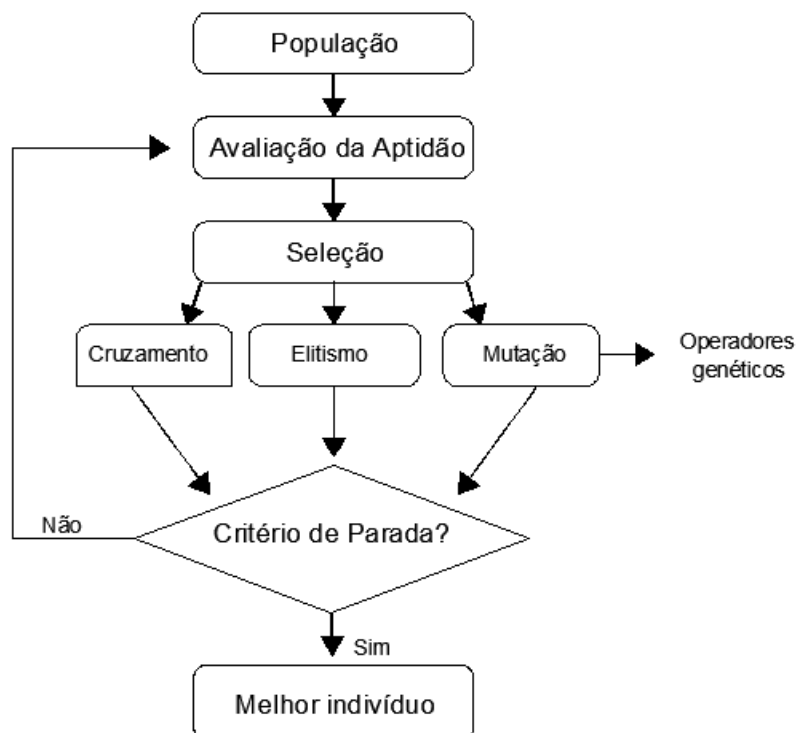


Figura 81 - Estrutura básica de um algoritmo genético

### 3.2.1 Consideração realizadas no processo de otimização

Limites inferiores e superiores foram aplicados nas variáveis (amortecimento e rigidez) a serem obtidas pela otimização, objetivando limitar a solução da função objetivo, tomando como base valores presentes na literatura (BROWNJOHN, 1999; COERMAN, 1962; ISO 7962, 1987; OLIVEIRA et al., 2014; NIGAN, 1987; WEI et al., 1998). Desse modo, as equações (26) e (27) foram empregadas para o cálculo dos limites dessas grandezas, de tal modo que os limites inferiores foram considerados sendo a metade dos valores calculados pelas referidas equações. Enquanto, para os limites superiores foi considerado para a rigidez o valor igual a 80.000N/m e para o amortecimento igual a 5.800Ns/m. Cabe ressaltar que a massa das pessoas, neste trabalho de pesquisa, foi obtida em laboratório, através da pesagem de todos os participantes dos ensaios experimentais realizados, portanto não foi determinada pelo processo de otimização.

$$k_i = 4\pi^2 f_i^2 m_i \quad (26)$$

$$c_i = 4\pi m_i \xi f_i \quad (27)$$



Onde  $k_i$ : rigidez do indivíduo  $i$  (N/m);  $m_i$ : massa do indivíduo  $i$  (kg);  $c_i$ : amortecimento do indivíduo  $i$  (Ns/m);  $f_i$ : frequência do indivíduo  $i$  (Hz);  $\xi$ : taxa de amortecimento igual a 0,25 (JOINT WORKING GROUP, 2008).

Outras considerações foram implementadas para que fosse possível a realização do processo de otimização: o tamanho da população foi considerado igual a 200; foram utilizadas 100 gerações; a taxa de cruzamento foi considerada igual a 0,75; e por fim, o elitismo foi considerado sendo igual a 2. Com relação à metodologia utilizada para os processos de seleção, mutação e cruzamento, foram escolhidas “Stochastic uniform”, “Adaptive Feasible” e “Two point”, respectivamente.

### 3.2.2 Desenvolvimento do processo de otimização

A solução da equação de equilíbrio dinâmico (Equação (28)) faz-se necessária para o emprego do Algoritmo Genético na determinação das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos.

$$F_i(t) = k_i \cdot x_i(t) + c_i \cdot v_i(t) + m_i a_i(t) \quad (28)$$

Onde  $F_i(t)$ : força produzida pelo indivíduo  $i$  (N) ao longo do tempo;  $k_i$ : rigidez do indivíduo  $i$  (N/m);  $m_i$ : massa do indivíduo  $i$  (kg);  $c_i$ : amortecimento do indivíduo  $i$  (Ns/m);  $x_i(t)$ : deslocamento do indivíduo  $i$  ao longo do tempo (m);  $v_i(t)$ : velocidade do indivíduo  $i$  ao longo do tempo (m/s);  $a_i(t)$ : aceleração do indivíduo  $i$  ao longo do tempo (m/s<sup>2</sup>).

É necessário minimizar a função objetivo, denominada “ $f_{obj}$ ”, apresentada na equação (29) para que a equação (28) seja solucionada. A função objetivo é composta pelo parâmetro  $corr\_1$  (Equação (30)). Esse parâmetro é caracterizado pela correlação entre a força experimental (Equação (31)) e a força otimizada (Equação (32)).

$$f_{obj} = 1 - (corr\_1)^2 \quad (29)$$

$$corr\_1 = corr(F_d, F_{d1}) \quad (30)$$

$$F_{d1} = F_{exp} - macelfpa \quad (31)$$

$$F_d = x(1) \text{vel}fpa_1 + x(2) \text{desl}fpa_1 \quad (32)$$

Onde  $\text{corr}_1$ : correlação entre forças;  $f_{\text{obj}}$ : função a ser minimizada através do AG;  $F_d$ : força otimizada (N);  $F_{d1}$ : força experimental do indivíduo (N) excluindo a parcela referente a aceleração multiplicada pela massa;  $F_{\text{exp}}$ : força experimental do indivíduo;  $m$ : massa do indivíduo determinada pela pesagem;  $\text{acelfpa}_1$ : aceleração experimental do indivíduo;  $\text{vel}fpa_1$ : velocidade experimental do indivíduo;  $\text{desl}fpa_1$ : deslocamento experimental do indivíduo;  $x(1)$ : amortecimento do indivíduo a ser determinada através da otimização;  $x(2)$ : rigidez do indivíduo a ser determinada através da otimização.

A partir da observação da função objetivo, nota-se a importância da correlação entre a força experimental e a força otimizada. É importante mencionar que correlação é a relação estatística entre duas ou mais variáveis, de maneira que, quando uma varia, a outra varia também. Nesse sentido, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) (TRIOLA, 2007) para avaliar o grau de associação linear entre as duas variáveis (força otimizada e força experimental). Quanto mais próximo de 1,0 for o valor do coeficiente de correlação de Pearson, mais forte é a correlação entre as variáveis, indicando uma função que melhor se ajusta aos dados amostrais. O cálculo do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) é apresentado na equação (33).

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (33)$$

Onde  $r$ : coeficiente de correlação de Pearson;  $x_i$ : elemento da primeira variável;  $y_i$ : elemento da segunda variável;  $\bar{x}$ : média dos valores de  $x_i$ ;  $\bar{y}$ : média dos valores de  $y_i$ .

De modo a ilustrar os resultados obtidos durante o processo de otimização realizado mediante o uso do programa MATLAB (2017), através do emprego de Algoritmos Genéticos, a Tabela 18 apresenta as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) referentes aos 25 (Vinte e cinco) primeiros ensaios. Os valores das características dinâmicas dos sistemas

biodinâmicos obtidas para todos os 100 (Cem) ensaios experimentais realizados se encontram no Apêndice A.

Tabela 18 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 1 a 25

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
1	92,70	820,94	42812,81
2	81,95	657,02	37521,26
3	67,80	547,48	34311,23
4	103,20	731,59	56476,16
5	65,50	515,59	35513,46
6	59,40	817,83	33525,97
7	82,65	874,99	43144,89
8	51,55	752,09	27494,99
9	68,00	530,29	37479,29
10	74,90	706,37	44151,98
11	74,90	467,48	34369,59
12	57,85	542,71	30262,11
13	87,55	778,75	41178,54
14	50,20	354,52	28591,69
15	59,70	399,20	43445,33
16	81,95	958,58	43467,55
17	91,85	1255,70	56394,76
18	69,70	645,85	38085,19
19	88,55	636,79	40037,26
20	64,80	768,36	37653,04
21	68,65	678,62	43094,19
22	80,65	445,92	34659,33
23	60,30	446,88	31366,35
24	86,25	845,05	28816,87
25	78,80	442,65	41174,06

A

Tabela 19 apresenta valores estatísticos (média, média quadrática, variância e desvio padrão) relacionados aos dados obtidos para as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) referentes aos 100 (Cem) ensaios experimentais realizados.

Tabela 19 - Valores estatísticos das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos

Características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos	Média	Média quadrática	Desvio padrão (DP)	Variância (V)	Coefficiente de variação
m (kg)	74,00	75,20	13,47	181,40	0,18
c (Ns/m)	845,13	929,63	389,21	151487,40	0,46
k (N/m)	34445,99	36224,10	11266,28	126928970,98	0,33

A obtenção da média e da média quadrática foi realizada para ser possível apontar onde se concentra a tendência de distribuição das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos. O desvio padrão representa uma medida de dispersão em torno da média que expressa o quanto um conjunto de dados se desvia da média, enquanto a variância é calculada elevando o desvio padrão ao quadrado.

Realizou-se o cálculo do coeficiente de variação, que representa a relação entre o desvio padrão e a média, com o intuito de avaliar a variação das características dinâmicas (massa, rigidez e amortecimento). Nesse sentido, a partir dos resultados presentes na

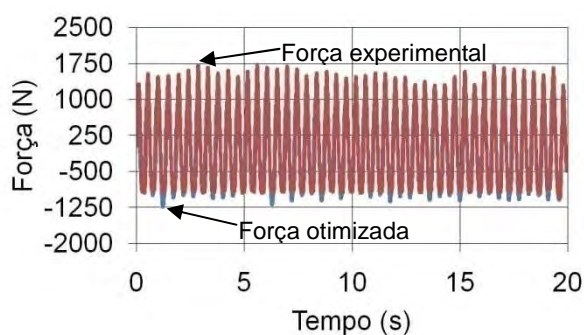
Tabela 19, verificou-se que a massa apresenta um menor coeficiente de variação quando comparada ao amortecimento e a rigidez.

A variação nos valores de massa é justificada pela aleatoriedade da escolha das pessoas participantes dos ensaios experimentais. Os valores dos coeficientes de variação associados ao amortecimento e à rigidez são justificados por alguns fatores, como por exemplo, a diferença de peso entre as pessoas, o tipo de calçado, a habilidade física e a forma com que cada pessoa pratica a atividade humana rítmica (torcida).

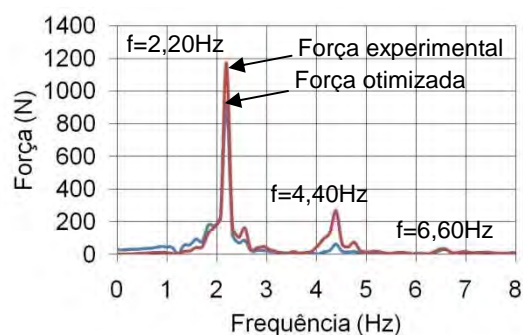
Os valores de massa, rigidez e amortecimento determinados foram posteriormente implementados na equação de equilíbrio dinâmico (Equação (28)), em conjunto com os valores de aceleração, velocidade e deslocamento,

determinados a partir da realização dos testes experimentais. Desse modo, torna-se possível encontrar o espectro da força otimizada produzida por cada pessoa participante dos ensaios, no domínio do tempo e no domínio da frequência, via uso do programa MATLAB (2017).

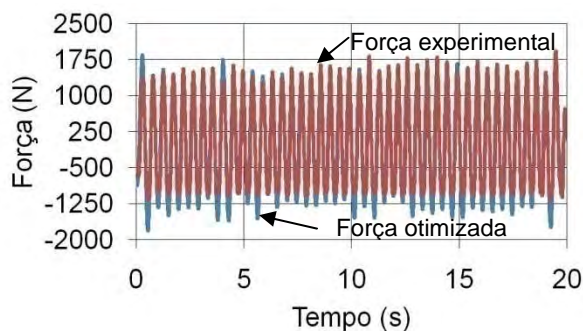
Objetivando validar os valores determinados, o espectro da força otimizada foi comparado com o espectro da força experimental obtidos para os ensaios das cem pessoas participantes, tomando como base a utilização do coeficiente de correlação de Pearson. As Figuras 82 a 86 ilustram essa comparação relativa a 5 (Cinco) das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios (ver Figuras 57, 61, 65, 69 e 73).



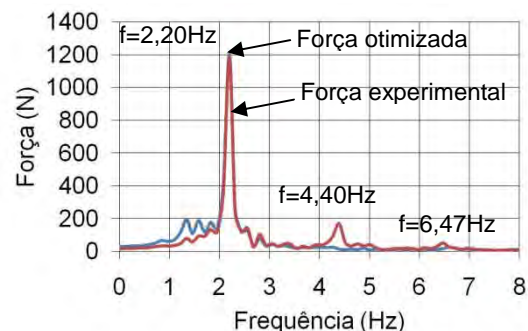
a) Domínio do tempo



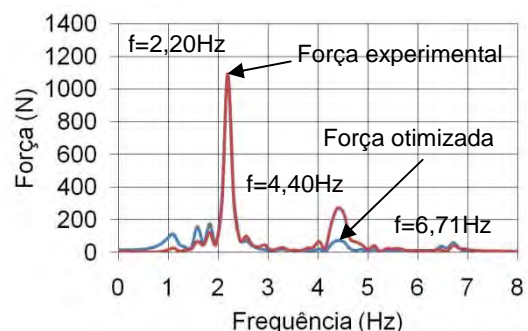
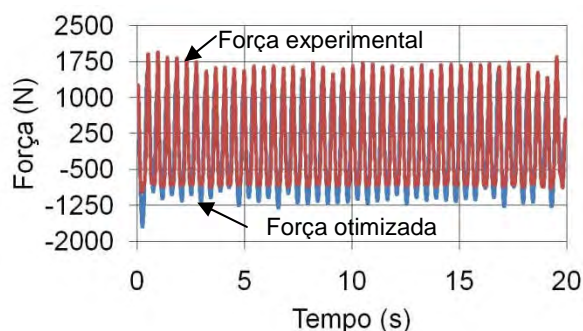
b) Domínio da frequência

Figura 82 - Espectros de força: Pessoa 1 ( $m=92,70\text{kg}$ )

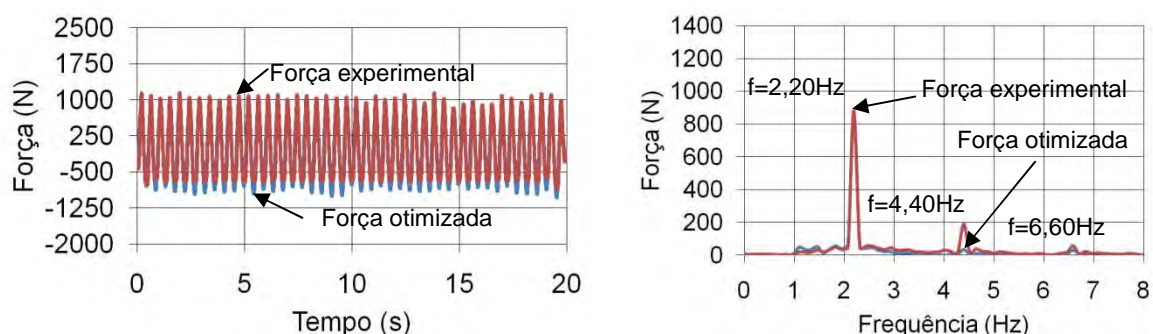
a) Domínio do tempo



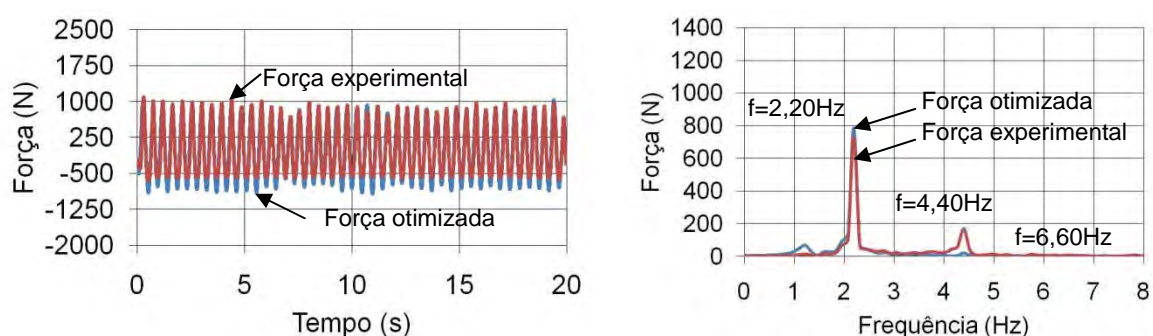
b) Domínio da frequência

Figura 83 - Espectros de força: Pessoa 4 ( $m=103,20\text{kg}$ )

a) Domínio do tempo  
 b) Domínio da frequência  
 Figura 84 - Espectros de força: Pessoa 7 (m=82,65kg)



a) Domínio do tempo  
 b) Domínio da frequência  
 Figura 85 - Espectros de força: Pessoa 10 (m=68kg)



a) Domínio do tempo  
 b) Domínio da frequência  
 Figura 86 - Espectros de força: Pessoa 16 (m=59,70kg)

Com base na análise dos espectros presentes nas Figuras 82 a 86, pode-se verificar que existe uma correlação satisfatória entre a força obtida experimentalmente e a força otimizada, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, o que demonstra que a força otimizada encontrada se ajusta à força obtida nos ensaios experimentais realizados. Na Tabela 20, são apresentados os valores encontrados para o coeficiente de correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) de 25 (Vinte e cinco) das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios. Os valores do coeficiente de correlação de Pearson obtidos para todos os 100 (Cem) ensaios experimentais realizados encontram-se no Apêndice B.

Tabela 20 - Correlação de Pearson das pessoas 1 a 25

Pessoa	Coeficiente de Pearson(r)	
	F <sub>d1</sub> x F <sub>d</sub> (domínio da frequência)	F <sub>d1</sub> x F <sub>d</sub> (domínio do tempo)
1	0,98	0,89
2	0,97	0,90
3	0,99	0,93
4	0,98	0,94
5	0,97	0,92
6	0,95	0,87
7	0,96	0,87
8	0,98	0,88
9	0,98	0,94
10	0,98	0,95
11	0,99	0,94
12	0,98	0,92
13	0,98	0,92
14	0,98	0,93
15	0,97	0,95
16	0,97	0,90
17	0,97	0,92
18	0,98	0,93
19	0,99	0,94
20	0,97	0,91
21	0,98	0,95
22	0,96	0,87
23	0,95	0,87
24	0,98	0,72
25	0,92	0,96

Os valores do coeficiente de correlação de Pearson presentes na Tabela 20, assim como os espectros presentes nas Figuras 82 a 86, indicam a existência de

uma correlação satisfatória entre a força obtida experimentalmente e a força otimizada, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

Em análises estatísticas existe uma técnica denominada regressão, que tem como objetivo a modelagem de um conjunto de dados de duas ou mais variáveis através de uma função analítica. No presente trabalho de pesquisa foram obtidas funções analíticas com a finalidade de estabelecer uma relação entre as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos [massa ( $m$ ), rigidez ( $k$ ) e amortecimento ( $c$ )], através da utilização do método dos mínimos quadrados. Para tal, somente as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos das 20 (Vinte) pessoas que apresentaram maiores valores de coeficiente de correlação de Pearson foram selecionadas. A Tabela 21 apresenta o valor do coeficiente de correlação de Pearson para as relações rigidez-massa, amortecimento-rigidez e amortecimento-massa, considerando os dados obtidos das referidas vinte pessoas, enquanto a Tabela 22 apresenta as expressões matemáticas encontradas, além do valor do coeficiente de correlação de Pearson das relações e do valor  $R^2$ , para assim ser possível a realização de uma verificação da fidedignidade das funções geradas a partir dos dados obtidos nos ensaios experimentais. As Figuras 87 a 89 representam graficamente as relações rigidez-massa, amortecimento-rigidez e amortecimento-massa.

Tabela 21 - Coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis

Relação	Coeficiente de Pearson (r)
k x m	0,87
c x k	0,94
c x m	0,82

Tabela 22 - Dados obtidos a partir de regressões

Expressão matemática	$R^2$	Coeficiente de Pearson (r)
$k = 443,92 m + 4969,60$	0,80	0,87
$c = 0,0282 k - 406,74$	0,88	0,94
$c = 12,614 m - 274,22$	0,70	0,82



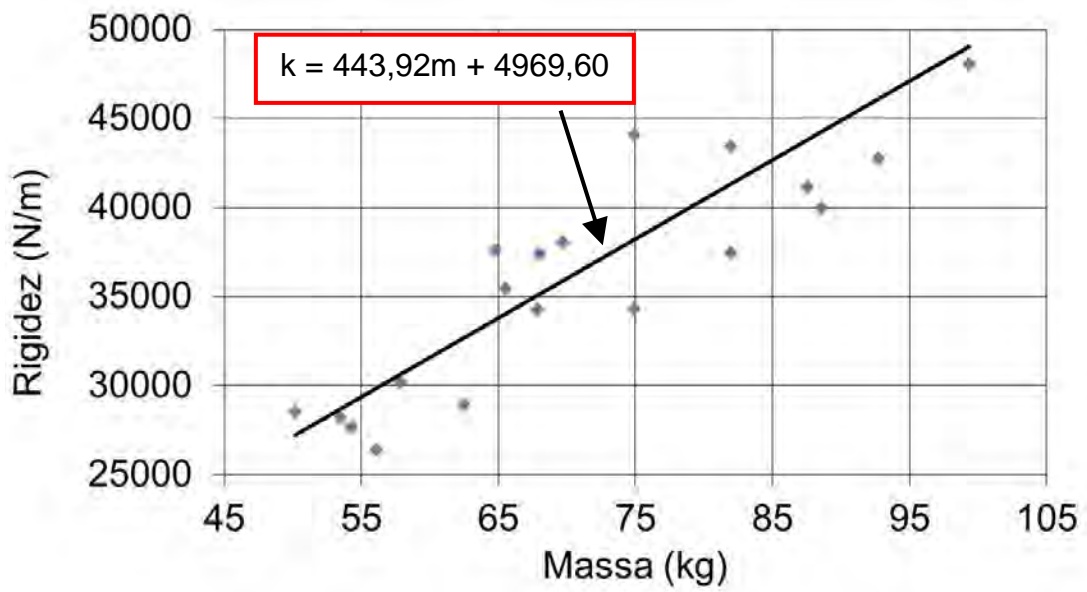


Figura 87 - Relação Rigidez x Massa

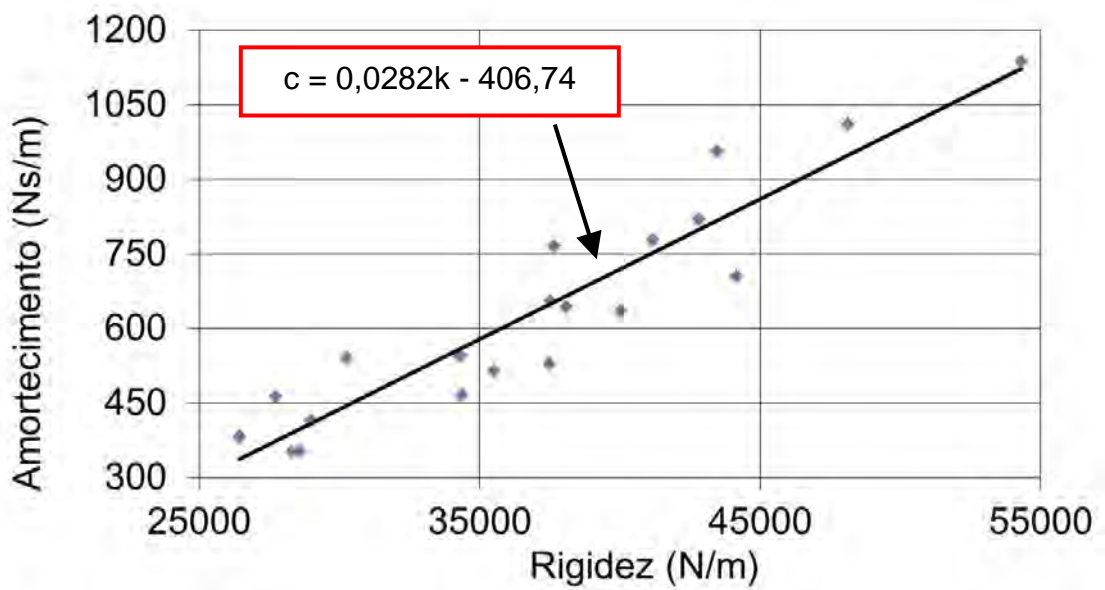


Figura 88 - Relação Amortecimento x Rigidez

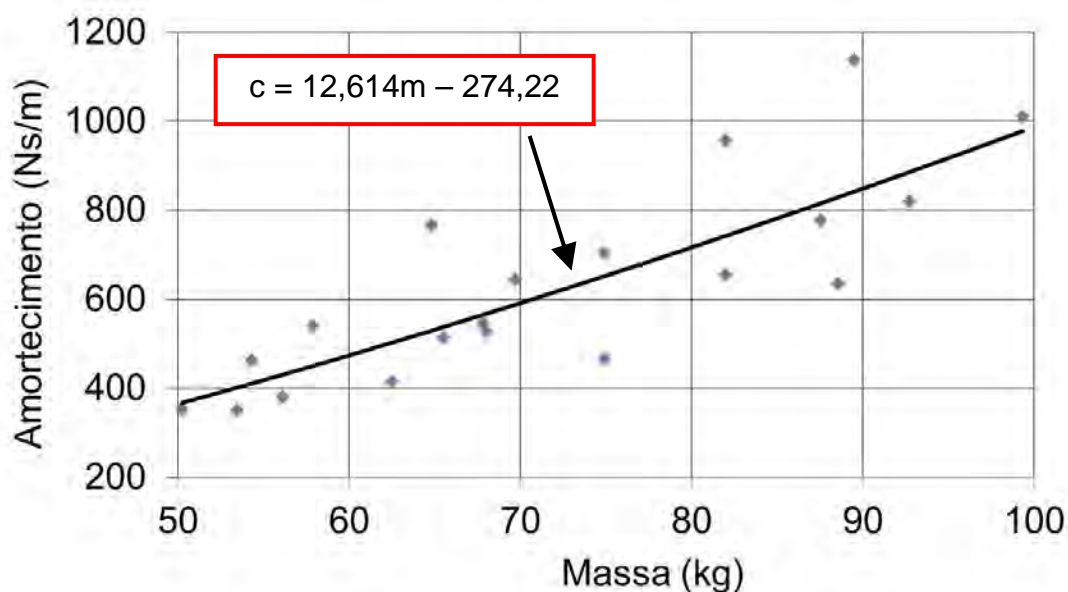


Figura 89 - Relação Amortecimento x Massa

As Figuras 87 a 89 ilustram os 20 (Vinte) pontos que apresentaram os maiores coeficientes de correlação de Pearson, assim como a reta que representa as expressões matemáticas que mais se adequam as relações rigidez-massa, amortecimento-rigidez e amortecimento-massa, respectivamente. Os valores dos coeficientes de correlação de Pearson e do  $R^2$ , presentes nas Tabelas 21 e 22 indicam a existência de uma correlação satisfatória entre as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento).

### 3.3 Considerações do capítulo

Este capítulo propôs um modelo biodinâmico para representar a ação dinâmica humana proveniente das pessoas (torcida). Para tal foram utilizados os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados, descritos no capítulo 2. Neste sentido, a determinação das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) foi realizada a partir da utilização de Algoritmos Genéticos (AG) para a resolução matemática de um problema clássico de otimização, via emprego do programa MATLAB (2017). Cabe ressaltar que foram obtidos os coeficientes de correlação de Pearson para as relações força experimental x força otimizada, além das relações entre as características dinâmicas (massa, rigidez e amortecimento) com o objetivo de validar os resultados obtidos.

## 4 MODELO ESTRUTURAL

O presente capítulo apresenta as características referentes ao projeto estrutural do novo Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha. As informações relativas à geometria da estrutura e às características físicas dos materiais empregados serão apresentadas.

O Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha é um complexo multiuso, que faz parte do Completo Poliesportivo Ayrton Senna, que também engloba o Autódromo Internacional de Brasília Nelson Piquet e o Ginásio de Esportes Nilson Nelson. O estádio possui uma área de 1,6 milhões de metros quadrados, que está preparado para receber eventos esportivos e culturais e fica localizado ao lado do Eixo Monumental, uma das principais vias de Brasília, e próximo a alguns dos ícones turísticos da cidade, como o Memorial JK. Possui capacidade para 71.400 pessoas (Lima, 2013).

O estádio foi inaugurado em 1974, porém, para ser palco dos confrontos da Copa do Mundo de 2014, foi demolido em 2010, para a construção de um novo estádio que atendesse a todas as exigências da FIFA. A inauguração do novo estádio aconteceu em 2013 e neste mesmo ano foi utilizado para jogos da Copa das Confederações. O referido estádio também foi palco do Desafio Internacional de Futsal, realizado em 2014, além de ter sediado dez partidas dos Jogos Olímpicos de 2016.

### 4.1 Modelo Estrutural do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha

O modelo estrutural investigado corresponde às arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha, composto por lajes, vigas, pilares e degraus de concreto armado. No referido estádio, existem quatro tipos de setores diferentes nas arquibancadas. O setor escolhido para ser estudado nesta investigação foi o setor 4G, por se tratar de um setor de largura intermediária, representando assim um comportamento médio dos diferentes setores existentes (Lima, 2013). A Figura 90 mostra a planta do estádio, com o setor 4G em destaque.

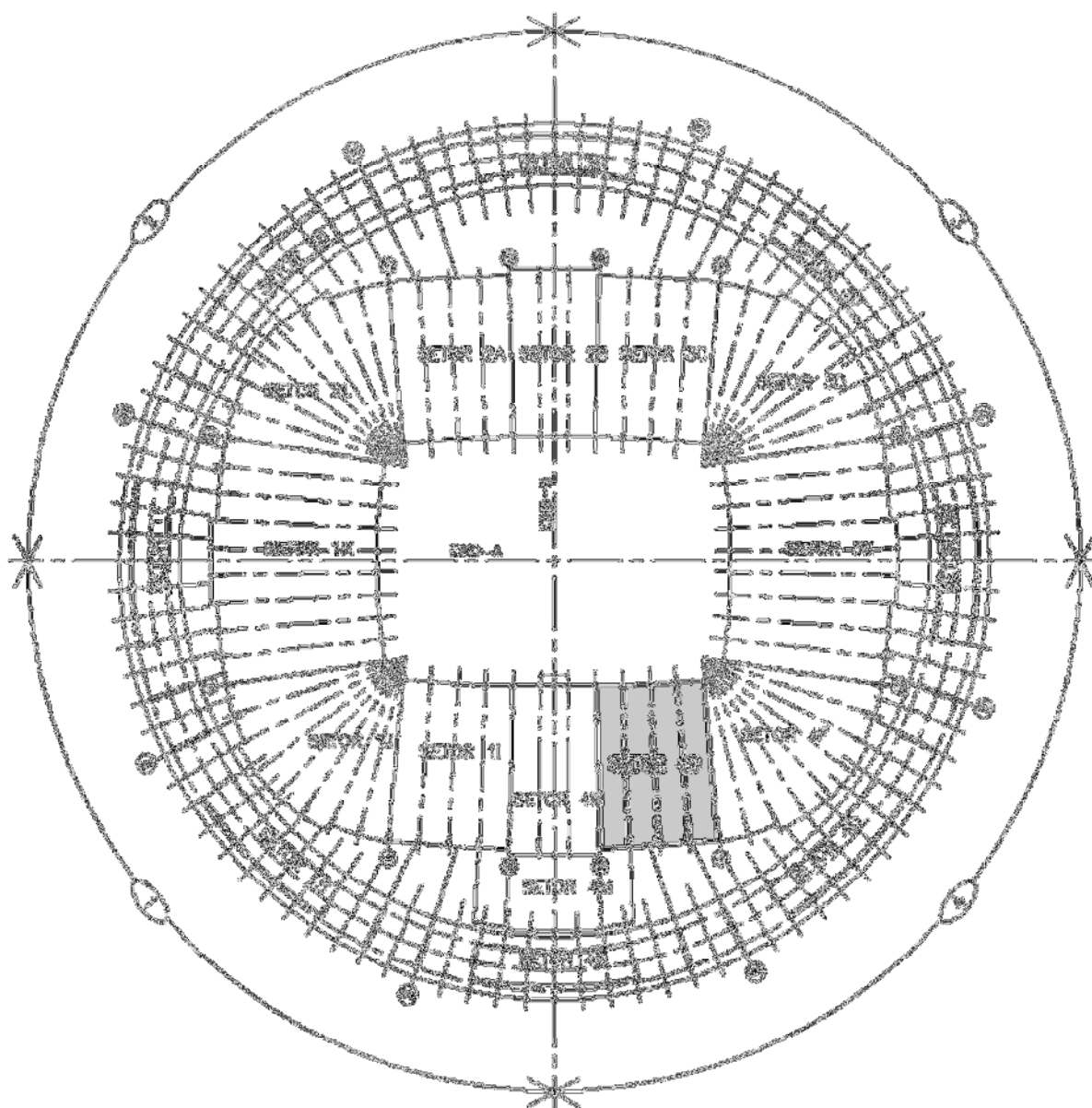
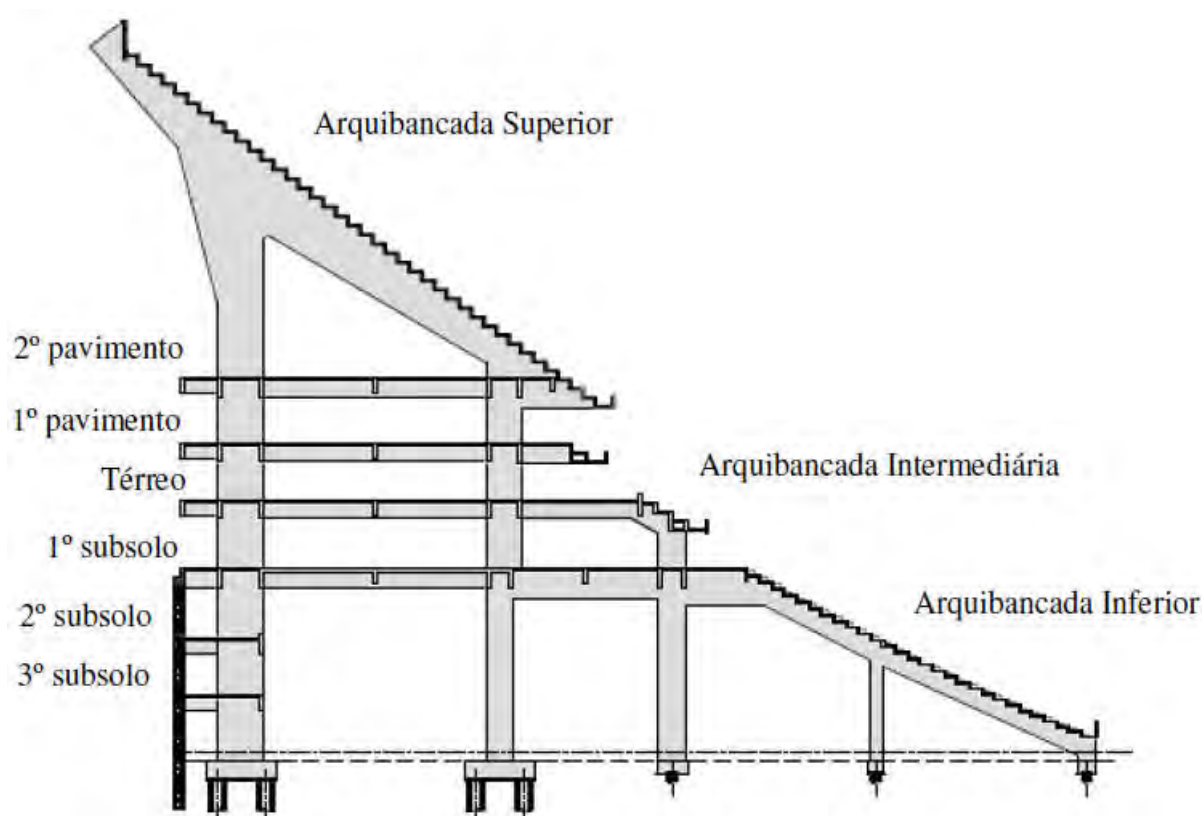


Figura 90 - Planta do Estádio (LIMA, 2013)

As arquibancadas, que possuem capacidade para comportar 71.400 pessoas (Lima, 2013), são divididas em três diferentes níveis: superior, intermediário (camarote) e inferior. A altura total do estádio é de 50,59m até a cobertura e a sua estrutura conta com mais de 288 pilares, com 36m de altura. A menor distância entre os assentos da arquibancada e o gramado é de 7,5m e as dimensões do gramado são de 105m x 68m.

Os degraus das arquibancadas superior e inferior possuem 0,80m de largura e a altura varia de 57cm a 62cm na arquibancada superior e de 32,2cm a 43cm na arquibancada inferior. Os pilares possuem seções diferentes, sendo que os pilares da extremidade possuem largura de 40cm, enquanto que os pilares intermediários possuem largura de 60cm. A geometria de toda estrutura do setor 4G se encontra descrita no Apêndice C. A Figura 91 mostra o corte radial da estrutura da arquibancada do estádio e as Figuras 92 e 93 mostram os cortes mais aproximados das arquibancadas superior e inferior, respectivamente.



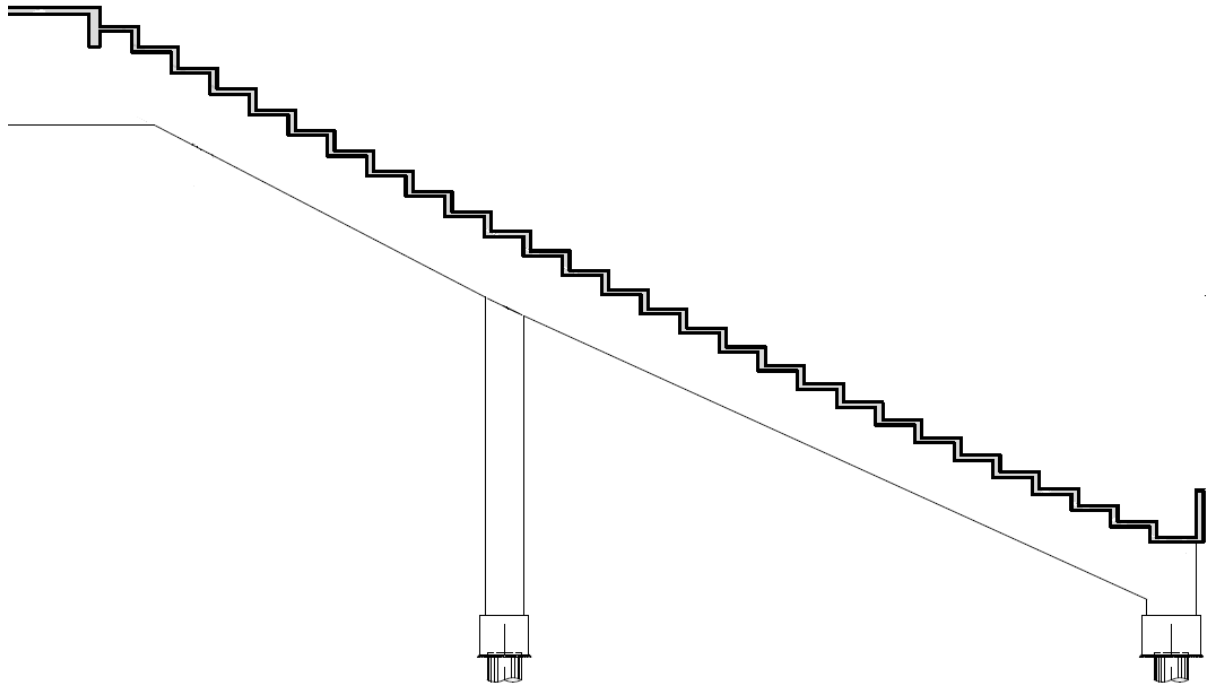


Figura 92 - Corte da arquibancada inferior

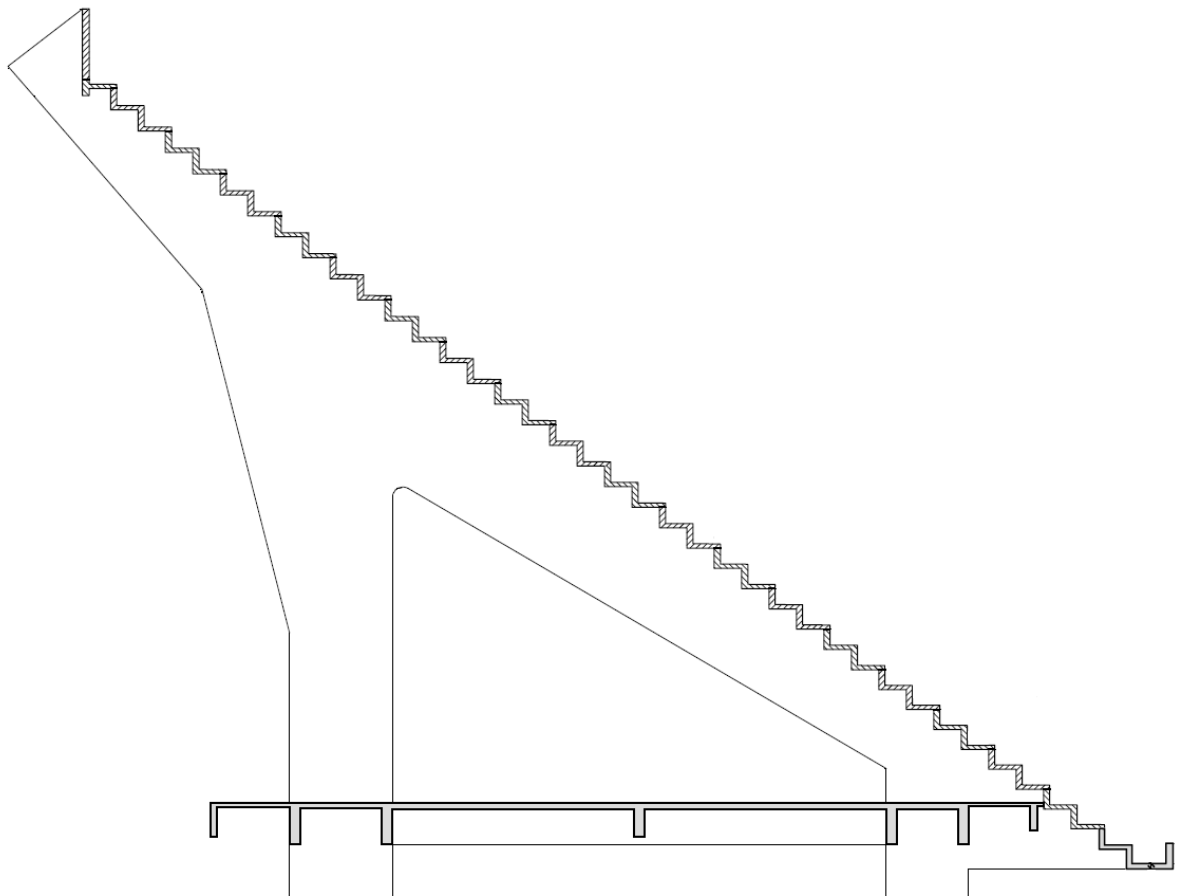


Figura 93 - Corte da arquibancada superior

Conforme pode ser visto na Figura 91, o estádio é uma estrutura composta por um grande pórtico, constituído por quatro linhas de pilares, onde a primeira e a segunda linhas de pilares são interligadas por vigas inclinadas, que são denominadas vigas-jacaré, que têm como função apoiar os degraus da arquibancada superior na estrutura. As vigas que se apoiam sobre os pilares são denominadas vigas principais (transversais) e aquelas que se apoiam sobre vigas principais são denominadas de vigas secundárias (internas).

Os diversos setores das arquibancadas são separados por juntas de dilatação, que tornam os setores estruturalmente independentes entre si. As arquibancadas possuem três setores em cada lateral, um setor atrás de cada gol e um setor em cada canto, totalizando doze setores.

As arquibancadas inferiores e intermediárias (camarote) foram executadas em concreto moldado no próprio canteiro de obras. A arquibancada superior contou com a utilização de 1.064 peças de concreto pré-moldadas, com intuito de acelerar a execução da obra (INFRAESTRUTURA URBANA, 2014).

O desenho da arquibancada levou em conta a análise dinâmica de posicionamento dos pilares de sustentação. Eles foram colocados em pontos estratégicos, de forma a garantir amortecimento e evitar a vibração da estrutura de concreto, causada pela movimentação das torcidas (INFRAESTRUTURA URBANA, 2014).

Com relação às lajes existentes embaixo das arquibancadas superior e intermediária (camarote), estas se apoiam nas vigas transversais e possuem seis pavimentos distintos, que são 3º subsolo, 2º subsolo, 1º subsolo, térreo, 1º pavimento e 2º pavimento. O 3º subsolo está no nível do gramado e é onde se encontram os vestiários, espaço para entrevista, circulação dos ônibus das delegações, garagem coberta e cômodos técnicos e de serviços. No 2º subsolo se encontra a arquibancada inferior e o acesso vip (acesso para a tribuna de honra e da presidência). No 1º subsolo é onde se encontra o acesso para a arquibancada inferior, instalações sanitárias e bares da arquibancada inferior e cômodos técnicos e de serviços. No térreo se encontra o acesso para a arquibancada intermediária, que é reservada para salas de imprensa e camarotes, além de espaço para eventos e convenções. No 1º pavimento também se encontra o acesso para a arquibancada intermediária, que é reservada para salas de imprensa e camarotes. E no 2º

pavimento é onde se encontra o acesso para a arquibancada superior e instalações sanitárias e bares da arquibancada superior.

Circunscrevendo as arquibancadas há três linhas concêntricas de pilares, sobre os quais se apoia uma cobertura circular que tem uma coroa de concreto armado em sua parte externa, e uma parte interna metálica, coberta por uma membrana especial, protegendo toda a arquibancada e, ainda, parte do campo. As arquibancadas e a cobertura são estruturas independentes. O acesso dos usuários é realizado através de oito rampas, distribuídas ao redor da arena, que leva o público de um nível mais baixo da área externa ao piso do nível 1º subsolo (Lima, 2013).

Quanto às características físicas dos materiais, o concreto possui módulo de elasticidade longitudinal secante ( $E_{cs}$ ) de 30GPa, coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) igual a 0,2 e peso específico ( $\gamma_c$ ) de 25kN/m<sup>3</sup>. Em seguida, as Figuras 94 a 96 mostram o estádio na época da construção, enquanto as Figuras 97 a 99 mostram o estádio já totalmente construído.



Figura 94 - Vista interna do estádio durante a construção (LIMA, 2013)





Figura 95 - Vista externa do estádio durante a construção (LIMA, 2013)



Figura 96 - Detalhe do setor da arquibancada avaliado (LIMA, 2013)



Figura 97 - Vista externa do estádio após a reconstrução (CASTRO MELLO ARQUITETOS, 2014)

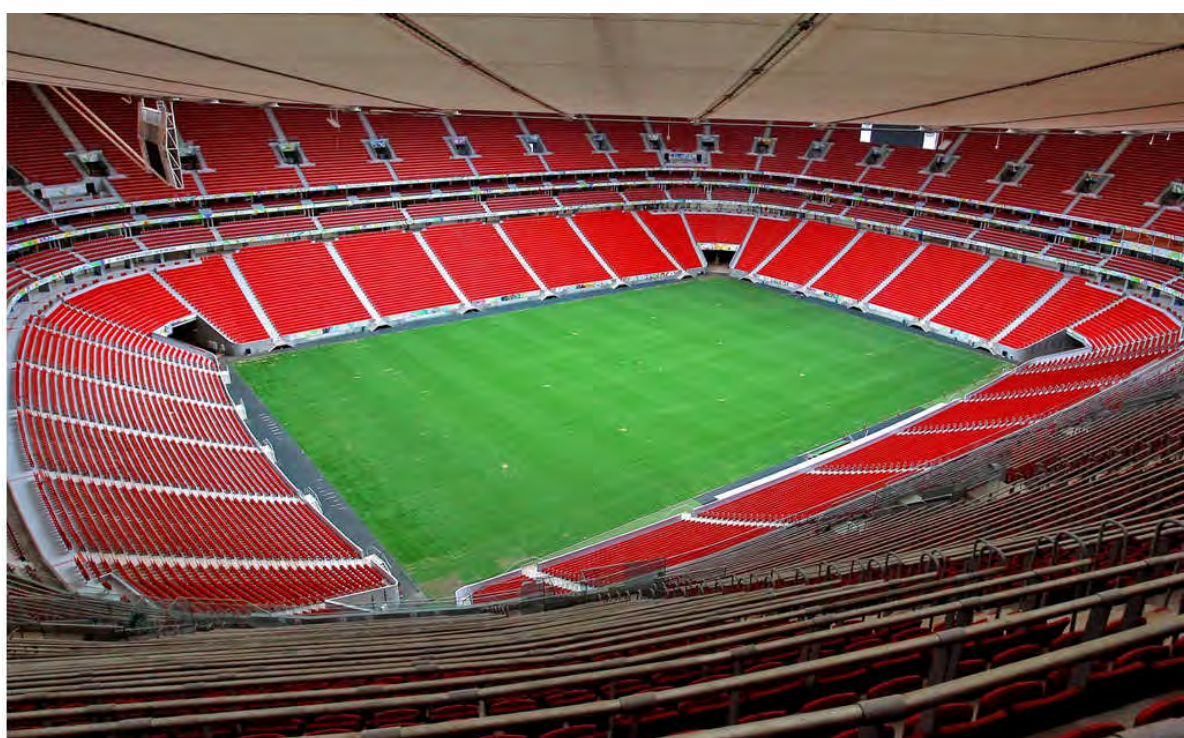


Figura 98 - Vista interna do estádio após a reconstrução (CASTRO MELLO ARQUITETOS, 2014)



Figura 99 - Vista interna de parte da arquibancada após a reconstrução (CASTRO MELLO ARQUITETOS, 2014)

#### 4.2 Considerações do capítulo

O modelo estrutural investigado, que corresponde às arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha, foi divulgado no presente capítulo com o objetivo de apresentar as características necessárias para o desenvolvimento da modelagem numérico-computacional do sistema estrutural. Cabe ressaltar que o setor 4G, que foi escolhido para a avaliação do comportamento da estrutura, representa um comportamento médio dos diferentes setores existentes no estádio.

## 5 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

Este capítulo apresenta o processo de modelagem numérico-computacional do sistema estrutural abordado no capítulo 4. O modelo computacional é necessário para a avaliação do comportamento dinâmico das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha. O presente capítulo aborda a discretização em elementos finitos do modelo estrutural, as condições de contorno e as simplificações consideradas.

### 5.1 Modelagem numérico-computacional

A modelagem numérico-computacional foi realizada através da utilização do programa ANSYS (2009), que se baseia no Método dos Elementos Finitos. O ANSYS (2009) pode ser utilizado em diversas classes de problemas que envolvem a engenharia, pois resolve diversos tipos de análises estruturais. Os primeiros parâmetros que são calculados em uma análise estrutural são os deslocamentos e as rotações. Já as deformações, tensões e força de reação são derivadas dos deslocamentos nodais. Os tipos de análises estruturais que podem ser executadas no ANSYS (2009) são as análises estática, modal, harmônica, dinâmica, espectral e de flambagem. Como o objetivo deste estudo é avaliar o conforto humano, com os resultados das análises modal e dinâmica será possível fazer essa avaliação.

A análise modal é utilizada para a determinação dos modos de vibração e das frequências naturais de uma estrutura, enquanto a análise dinâmica é utilizada para determinar a resposta de uma estrutura quando a mesma está submetida a carregamentos variáveis ao longo do tempo.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico utilizado para a solução de problemas da mecânica do contínuo dentro de uma tolerância aceitável. O método é aplicado a partir da divisão de um sistema, a ser analisado, em partes discretas menores, que é a discretização do modelo. A discretização consiste em modelar o corpo pela divisão em um sistema equivalente de corpos menores (elementos finitos), ou unidades, interconectados em pontos comuns a dois ou mais elementos (nós ou pontos nodais), incluindo as condições de contorno (apoios) e os carregamentos. Ressalta-se que ao longo da modelagem é considerado um comportamento elástico-linear para o material concreto armado.

Uma grande vantagem desse método é a sua capacidade de resolução de problemas cuja solução analítica seria excessivamente complexa ou até mesmo inexistente. A utilização do Método dos Elementos Finitos permite a construção de modelos com geometria irregular, carregamentos gerais, materiais diferentes, condições de contorno diversas, diferentes tipos de análises e tratamento de não linearidades geométricas ou do material.

A representação do pórtico, das lajes e dos degraus foi realizada através da utilização do elemento denominado SHELL63 (ANSYS, 2009), enquanto para representar as vigas internas foi utilizado o elemento denominado BEAM44 (ANSYS, 2009). A caracterização do modelo biodinâmico representativo da ação dinâmica humana foi realizada através do emprego do elemento denominado COMBIN40 (ANSYS, 2009).

O elemento SHELL63 (ANSYS, 2009) é um elemento de casca, definido por quatro nós e considera efeitos de membrana e/ou de flexão. Este elemento possui seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações associadas às direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , como mostrado na Figura 100.

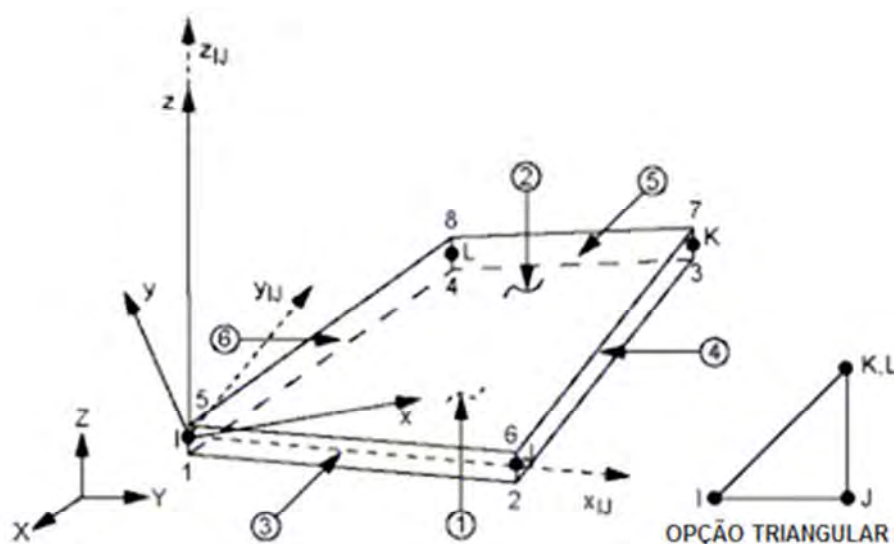


Figura 100 - Elemento SHELL63 (ANSYS, 2009)

O elemento BEAM44 (ANSYS, 2009) é um elemento uniaxial, tridimensional, composto por dois nós, possuindo seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações associadas às direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , como ilustrado na Figura

101. Permite a utilização de diferentes geometrias nas extremidades opostas da barra. A orientação do elemento vai do nó I para o nó J, sendo esse eixo o x. Os eixos principais y e z estão localizados na seção transversal.

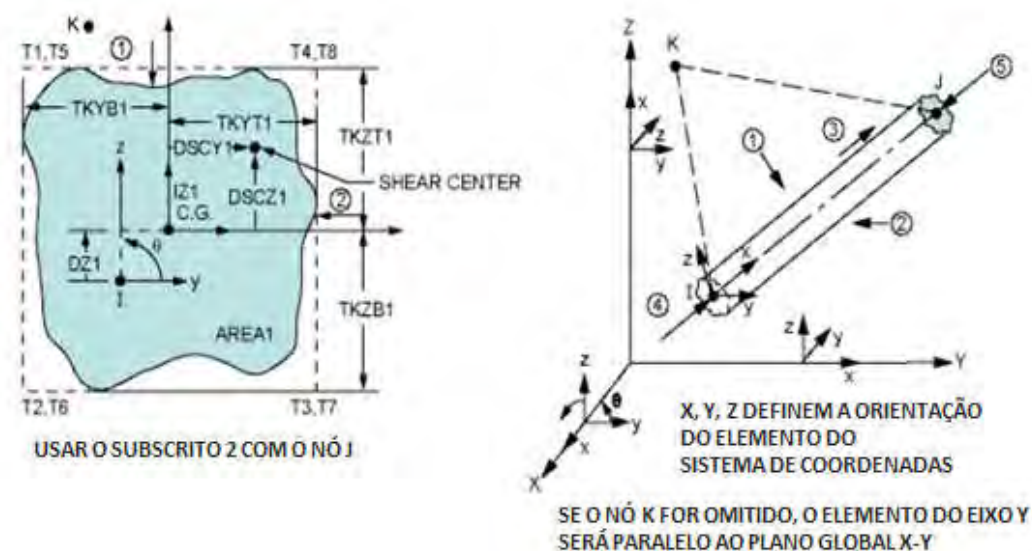


Figura 101 - Elemento BEAM44 (ANSYS, 2009)

O elemento COMBIN40 (ANSYS, 2009) é um elemento constituído por massa, mola e amortecedor, sendo composto por dois nós, possuindo apenas um grau de liberdade por nó, podendo ser uma translação ou uma rotação ou ainda a pressão ou a temperatura nodal. A Figura 102 ilustra o referido elemento.

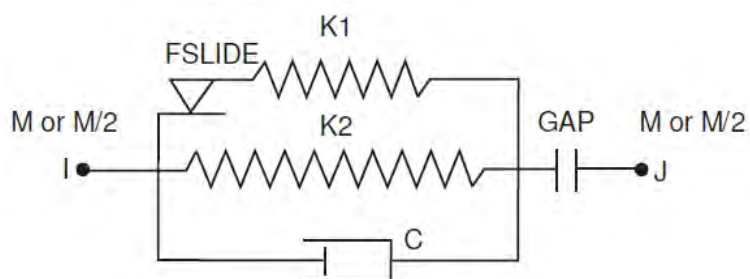


Figura 102 - Elemento COMBIN40 (ANSYS, 2009)

O modelo numérico possui um grau de refinamento adequado, permitindo uma boa representação do comportamento estrutural da arquibancada investigada, apresentando 34.873 nós, 28.005 elementos finitos de casca SHELL63 (ANSYS,

2009), 2.170 elementos finitos de viga BEAM44 (ANSYS, 2009), 4.161 elementos finitos COMBIN40 (ANSYS, 2009) e possui 333.675 graus de liberdade.

As seguintes considerações para a representação do modelo computacional foram adotadas: as seções transversais permanecem planas após as solicitações de carregamento (hipótese de Bernoulli) e o material (concreto) trabalha no regime elástico-linear com isotropia.

Toda estrutura foi modelada de acordo com a geometria descrita no projeto de forma, considerando que o material utilizado, que é o concreto armado, possui módulo de elasticidade secante igual a 30GPa. As condições de contorno foram aplicadas sobre o modelo numérico na base da estrutura, ou seja, nos pilares, de modo a restringir todos os deslocamentos e rotações nas três direções, simulando, desta forma, um engaste. A Tabela 23 quantifica os elementos, nós e graus de liberdade do modelo, enquanto as Figuras 103 a 111 apresentam vistas do modelo estrutural em elementos finitos da arquibancada. Cabe ressaltar, que o eixo projetado na vista isométrica da Figura 103 é adotado para todas as vistas posteriores (Figuras 103 a 111). Cabe ressaltar que o eixo X é paralelo ao comprimento da arquibancada, eixo Y representa o eixo vertical do modelo, sendo paralelo a altura da arquibancada, e o eixo Z é paralelo à largura da arquibancada.

Tabela 23 - Características presentes no modelo numérico-computacional

Características	Quantidade
Elemento SHELL63	28.005
Elemento BEAM44	2.170
Elemento COMBIN40	4.161
Nós	34.873
Graus de Liberdade	333.675

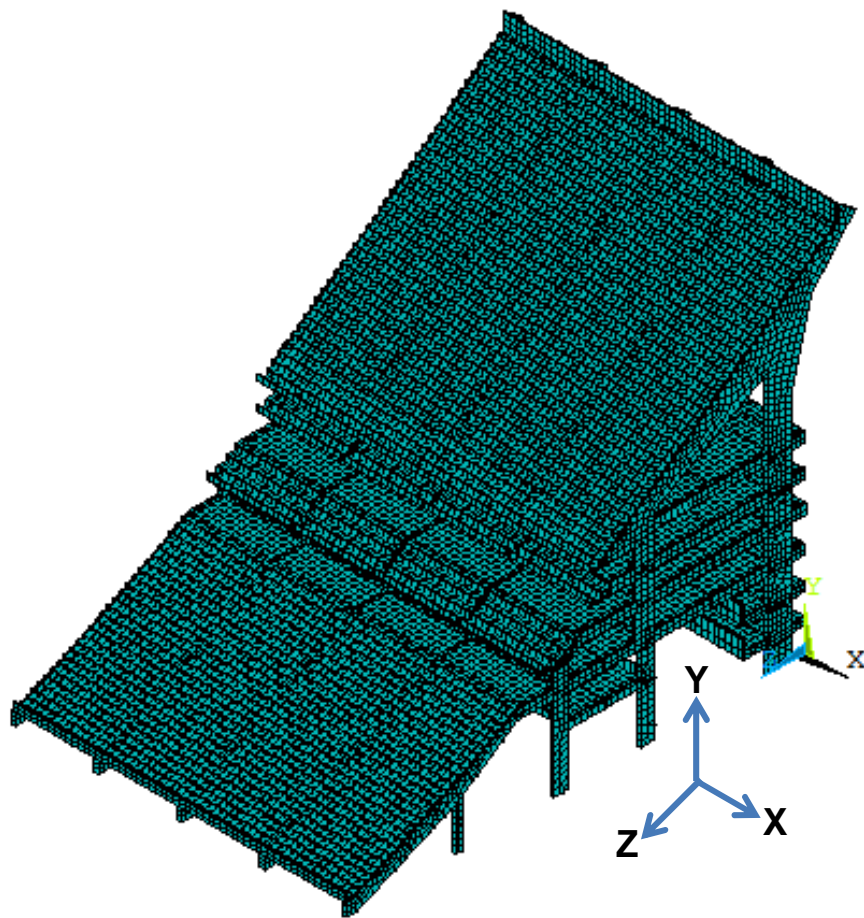


Figura 103 - 1º vista isométrica do modelo discretizado.

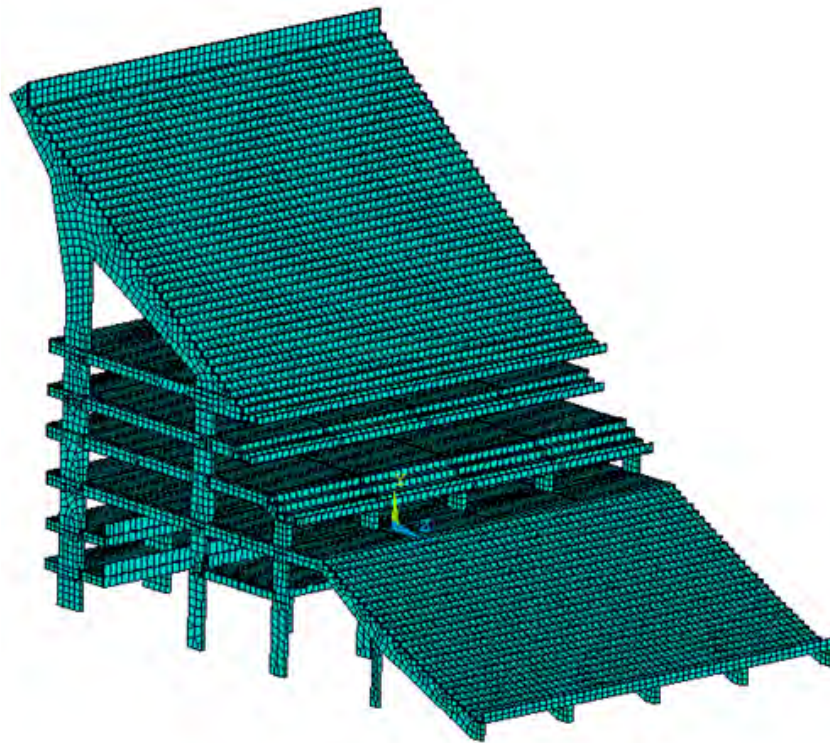


Figura 104 - 2º vista isométrica do modelo discretizado



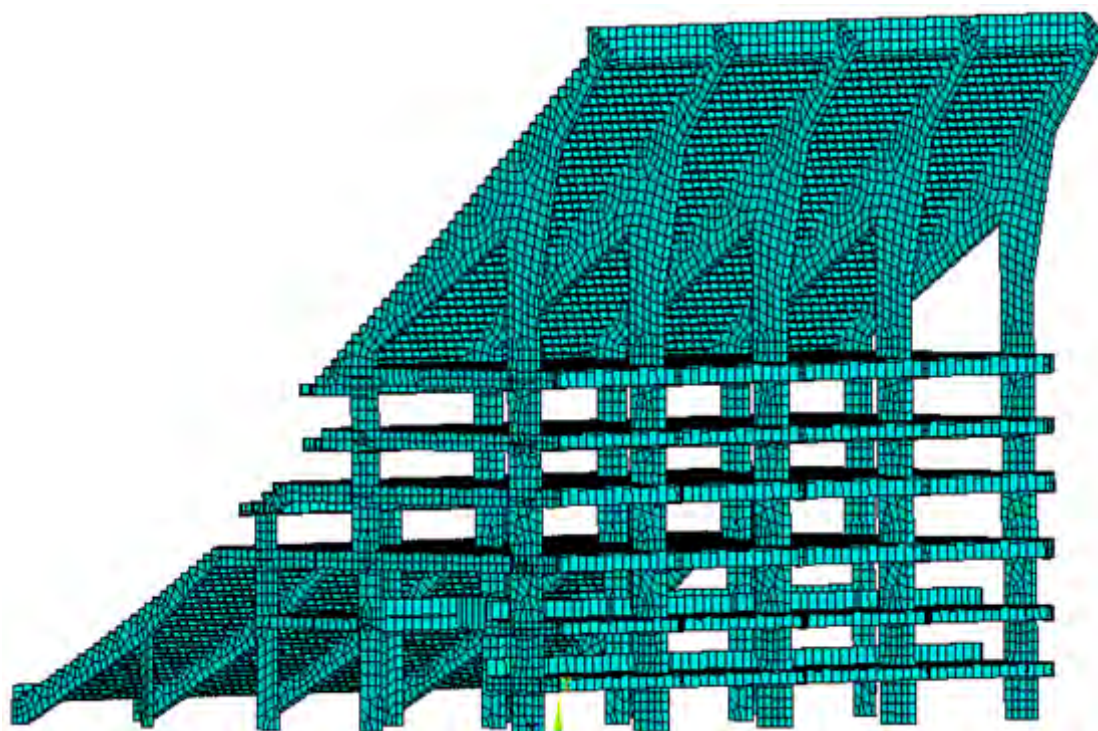


Figura 105 - 3<sup>o</sup> vista isométrica do modelo discretizado

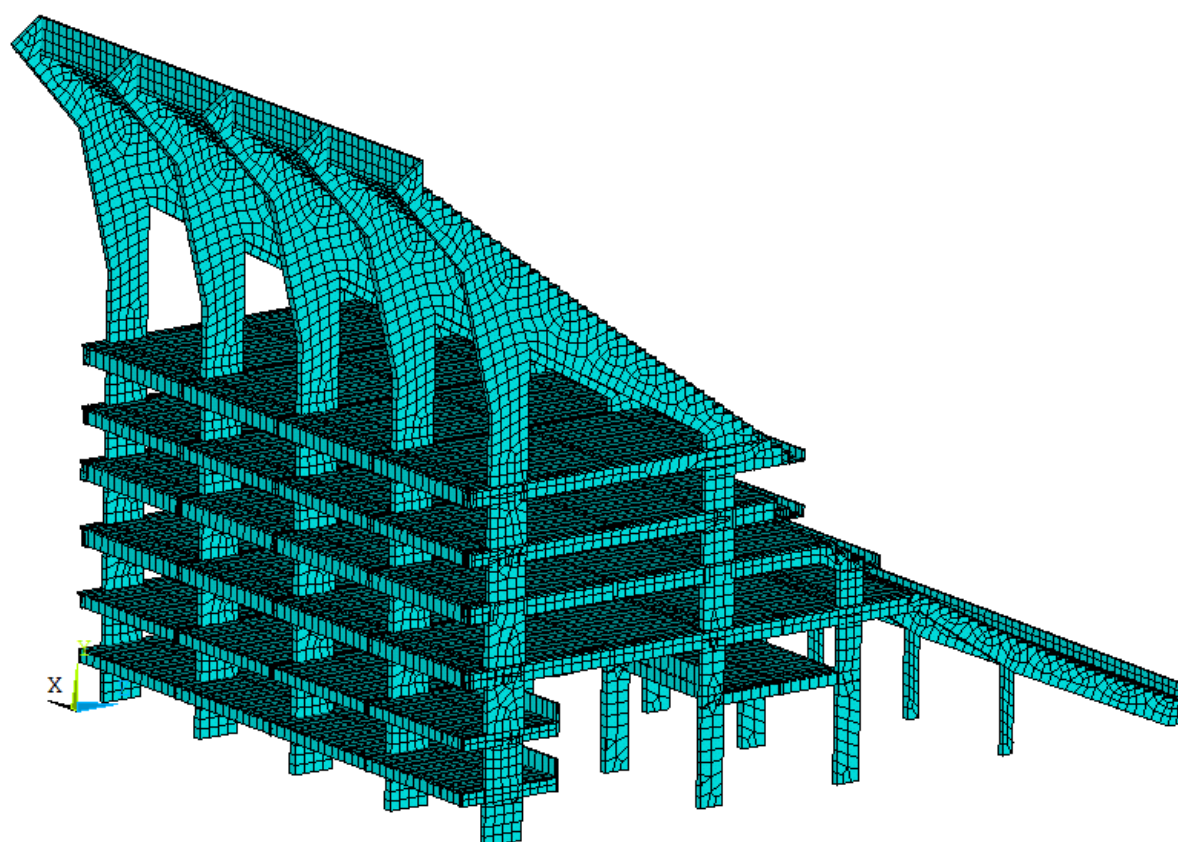


Figura 106 - 4<sup>o</sup> vista isométrica do modelo discretizado

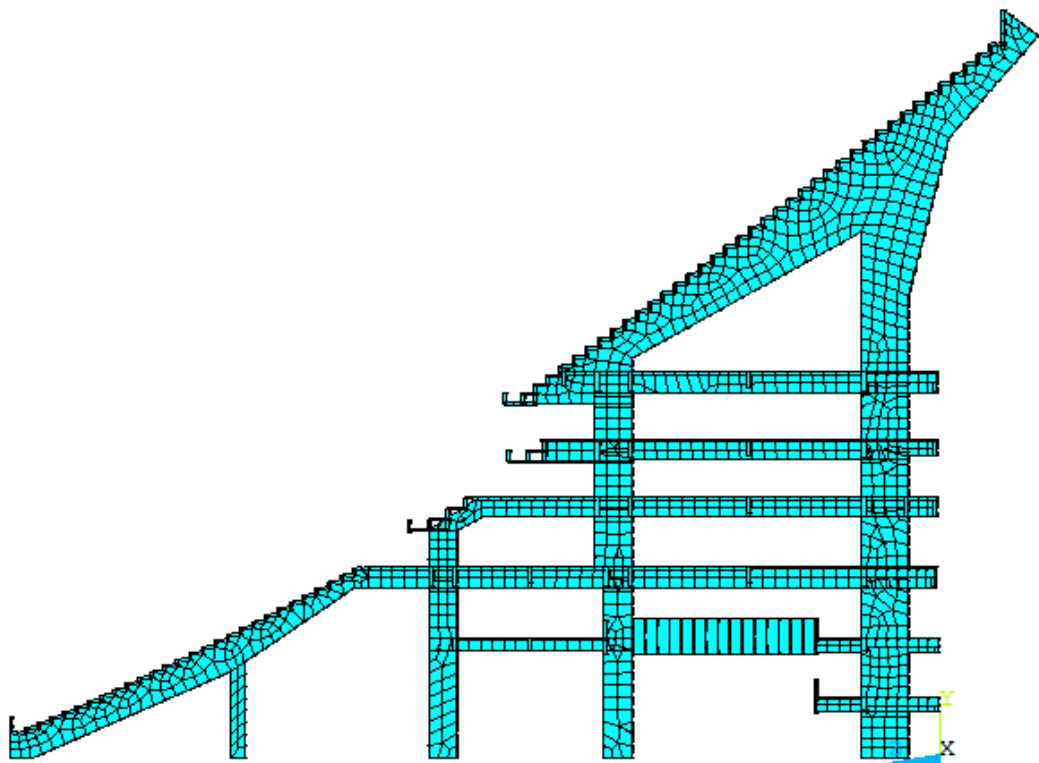


Figura 107 - Vista da lateral esquerda do modelo discretizado

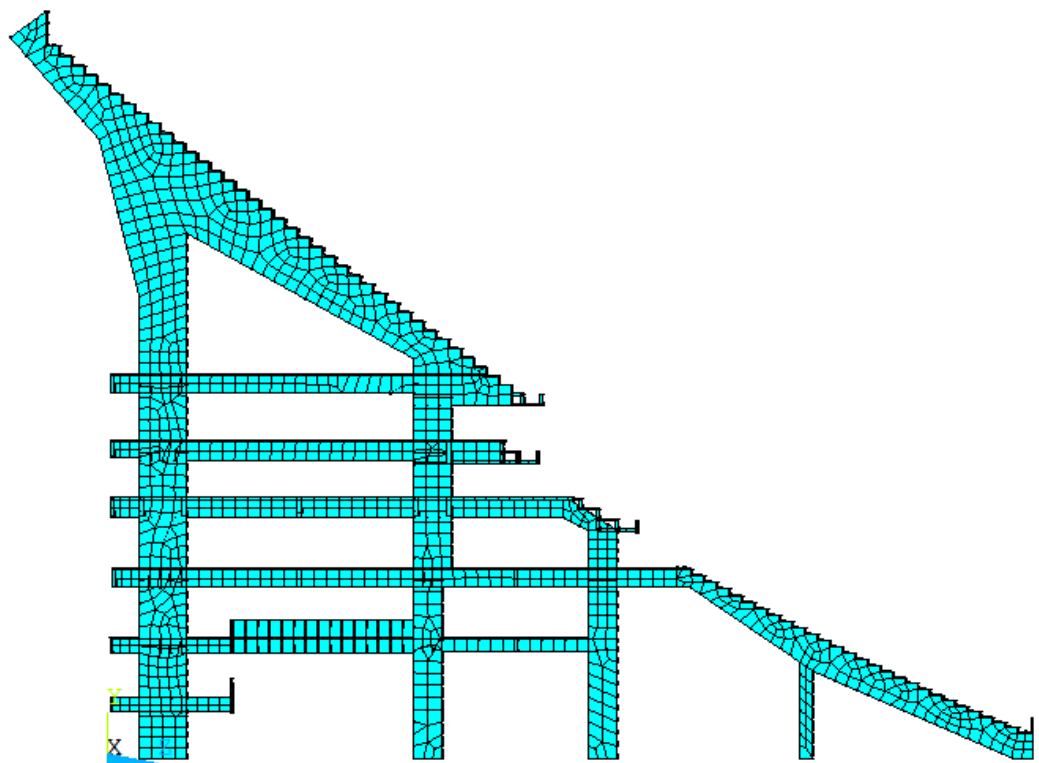


Figura 108 - Vista da lateral direita do modelo discretizado

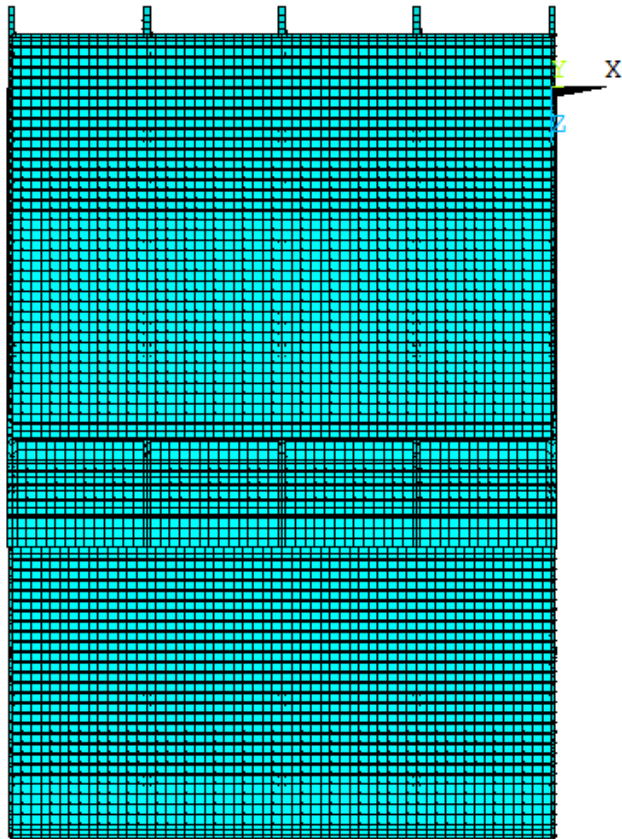


Figura 109 - Vista de cima do modelo discretizado

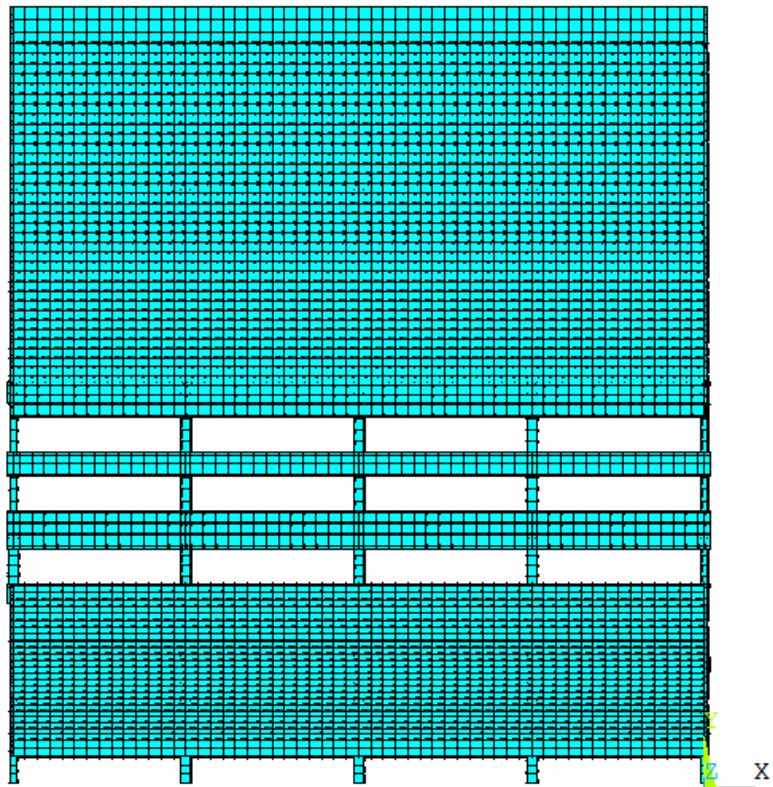


Figura 110 - Vista frontal do modelo discretizado

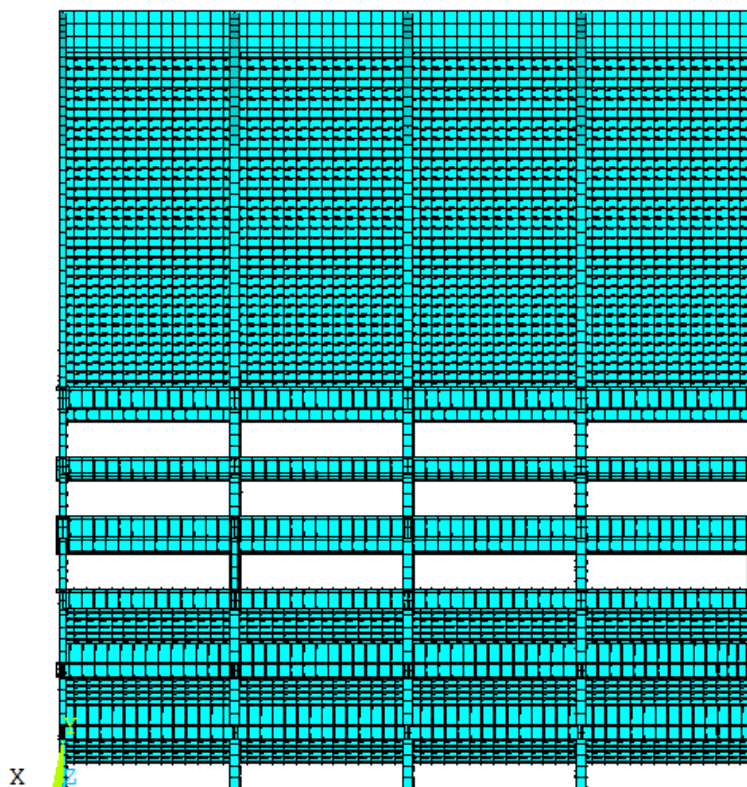


Figura 111 - Vista da parte de trás do modelo discretizado

## 5.2 Modelagem do amortecimento estrutural

O amortecimento é definido como sendo o processo pelo qual a energia proveniente do movimento vibratório é dissipada. Entretanto, avaliar o amortecimento de uma estrutura é tarefa bastante difícil, pois o amortecimento não depende apenas das propriedades intrínsecas dos materiais que compõem a estrutura, mas também de materiais e elementos que estejam acoplados à estrutura.

O amortecimento é usualmente obtido através da matriz de amortecimento de Rayleigh, que considera uma contribuição da rigidez ( $\delta$ ) e uma contribuição da massa ( $\alpha$ ), apresentada na equação (34). Sendo que  $M$  é a matriz de massa e  $K$  é a matriz de rigidez do sistema estrutural, segundo Clough e Penzien (1993) e Chopra (2007).

$$C = \alpha M + \delta K \quad (34)$$

A taxa de amortecimento modal pode ser escrita em termos da frequência natural circular (rad/s), de acordo com a equação (35):

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_{0i}} + \frac{\delta\omega_{0i}}{2} \quad (35)$$

Onde:  $\xi_i$ : taxa de amortecimento do modo  $i$ ;  $\omega_{0i}$ : frequência natural circular do modo  $i$ .

Isolando  $\alpha$  e  $\delta$  da equação (35) para duas frequências naturais importantes, tem-se as equações (36) e (37):

$$\alpha = 2\xi_1\omega_{01} - \delta\omega_{01}\omega_{01} \quad (36)$$

$$\delta = \frac{2(\xi_2\omega_{02} - \xi_1\omega_{01})}{\omega_{02}\omega_{02} - \omega_{01}\omega_{01}} \quad (37)$$

A partir de duas frequências naturais é possível descobrir os valores de  $\alpha$  e  $\delta$ . Em geral, a frequência natural  $\omega_{01}$  é tomada como a menor frequência natural, ou frequência fundamental da estrutura, e  $\omega_{02}$  como a segunda frequência mais importante no carregamento.

O guia SCI (2009) menciona que vários sistemas estruturais, na prática, possuem uma taxa de amortecimento da ordem de 1%. Essa taxa de amortecimento está relacionada ao sistema estrutural no “osso”, ou seja, antes da estrutura estar acabada, onde poucos elementos não estruturais contribuem para o amortecimento. Embora o guia cite que os valores de taxa de amortecimento para sistemas estruturais no “osso” não sejam utilizados regularmente, pois a estrutura não estará assim quando for ocupada, pode ser útil a avaliação do nível de vibrações nesta situação, pois podem aumentar os comentários adversos em relação ao conforto humano antes de a construção estar completamente acabada.

De acordo com a ISO 10137 (2007), a taxa de amortecimento para pisos depende do tipo de construção, material, presença de elementos não estruturais, idade, qualidade da construção, amplitude e frequência da vibração. A presença ou ausência de fissuras também é significativa para estrutura de concreto. Esta norma

recomenda que o amortecimento do sistema estrutural esteja situado na faixa de 1% a 3%.

O amortecimento estrutural foi considerado como sendo igual a 1%, ficando assim situado na faixa de 1% a 3%, de acordo com a ISO 10137 (2007) e também dentro do valor mencionado pelo SCI (2009). Entretanto, cabe ressaltar que em outras referências o valor do amortecimento estrutural sofre variações (CEB 209 (1991), NÓBREGA (2004)).

### 5.3 Considerações do capítulo

O desenvolvimento do modelo numérico-computacional no presente trabalho ocorreu a partir da utilização do programa ANSYS (2009). A discretização da malha foi realizada com o emprego de elementos SHELL63 (ANSYS, 2009) para representar o pórtico, as lajes e os degraus, elementos denominados BEAM44 (ANSYS, 2009) reproduzem as vigas internas e elementos COMBIN40 (ANSYS, 2009) caracterizam os sistemas biodinâmicos representativos da ação dinâmica humana. Cabe ressaltar que o amortecimento estrutural considerado no presente estudo foi de 1%. A partir desse modelo foi possível a realização das análises modal (vibração livre) e transiente (vibração forçada), que são apresentadas nos capítulos seis e sete, respectivamente.

## 6 ANÁLISE MODAL

A partir do conhecimento das frequências naturais da estrutura e seus respectivos modos de vibração se verifica o comportamento do sistema estrutural face ao carregamento dinâmico; essa análise é chamada de análise modal (vibração livre). Segundo Avelino (2008), esta análise reflete o comportamento dinâmico básico da estrutura e constitui uma indicação de como esta responderá ao carregamento atuante sobre a mesma. Este problema clássico de autovalores e de autovetores é resolvido numericamente mediante o emprego do programa computacional ANSYS (2009).

### 6.1 Análise das frequências naturais (autovalores) e dos modos de vibração (autovetores) considerando a arquibancada vazia

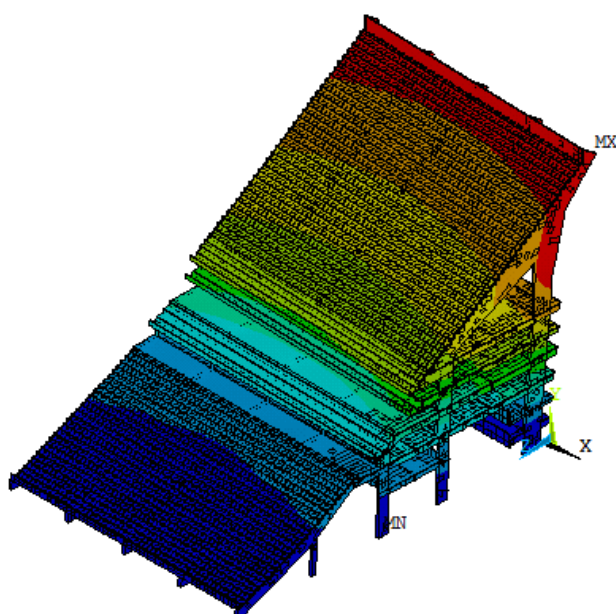
As frequências naturais dos dez primeiros modos de vibração para o modelo estrutural estudado foram obtidas, considerando que a estrutura não está ocupada. Também foram obtidos os valores de massa modal, rigidez modal e amortecimento modal associados a cada modo de vibração. A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 24 - Frequências naturais da arquibancada vazia

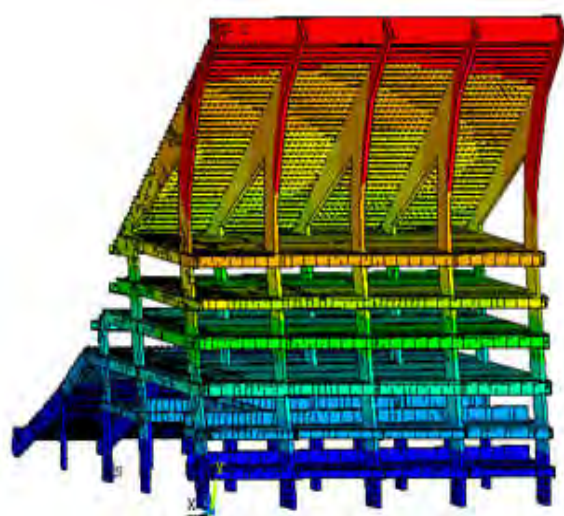
Modo de vibração	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)	Frequência (Hz)
$f_{01}$	$24,644 \times 10^5$	$0,916 \times 10^8$	$1,793 \times 10^7$	0,9706
$f_{02}$	$23,939 \times 10^5$	$4,938 \times 10^8$	$4,103 \times 10^7$	2,2859
$f_{03}$	$1,322 \times 10^5$	$0,318 \times 10^8$	$0,245 \times 10^7$	2,4699
$f_{04}$	$28,507 \times 10^5$	$9,041 \times 10^8$	$6,058 \times 10^7$	2,8343
$f_{05}$	$7,735 \times 10^5$	$8,005 \times 10^8$	$2,969 \times 10^7$	5,1202
$f_{06}$	$0,594 \times 10^5$	$0,709 \times 10^8$	$0,245 \times 10^7$	5,4994
$f_{07}$	$0,663 \times 10^5$	$0,813 \times 10^8$	$0,277 \times 10^7$	5,5713
$f_{08}$	$1,147 \times 10^5$	$1,473 \times 10^8$	$0,490 \times 10^7$	5,7020
$f_{09}$	$1,469 \times 10^5$	$1,914 \times 10^8$	$0,633 \times 10^7$	5,7464
$f_{10}$	$1,603 \times 10^5$	$3,022 \times 10^8$	$0,830 \times 10^7$	6,9100

De acordo com a definição realizada por Ohlsson (1982), o sistema estrutural investigado neste trabalho pode ser classificado como um piso pesado, uma vez que a massa modal relacionada ao modo de vibração de interesse ( $f_{02}=2,28\text{Hz}$ ) possui mais de 1.000kg.

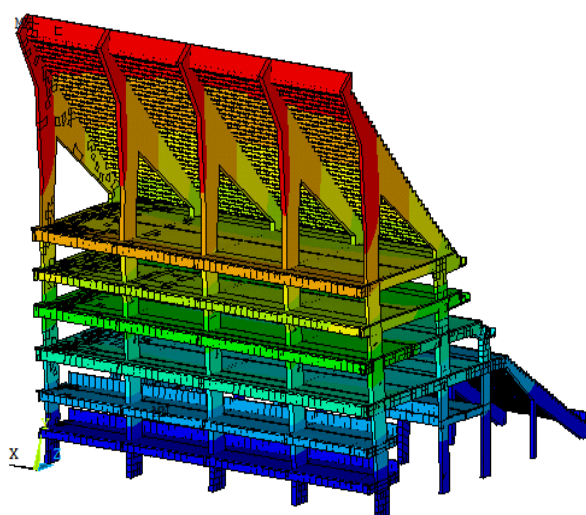
As Figuras 112 a 121 apresentam os dez primeiros modos de vibração (autovetores) do modelo estrutural associado as suas respectivas frequências naturais (autovalores). A descrição dos modos de vibração é apresentada na Tabela 25.



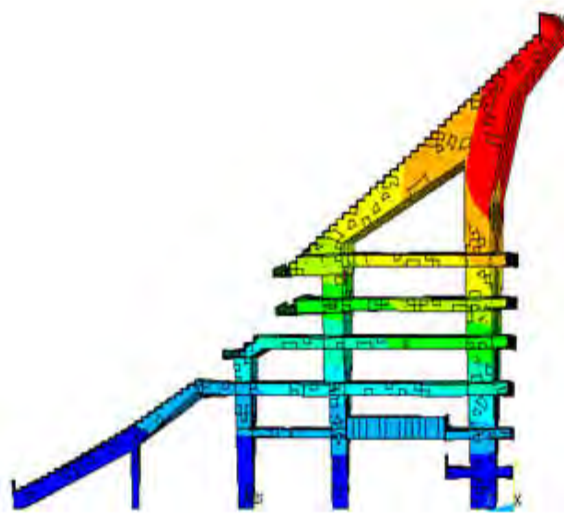
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás



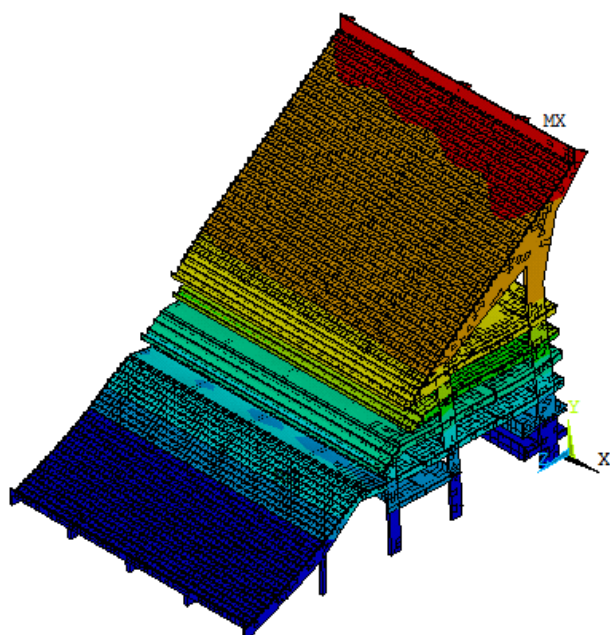
c) 2º vista isométrica de trás



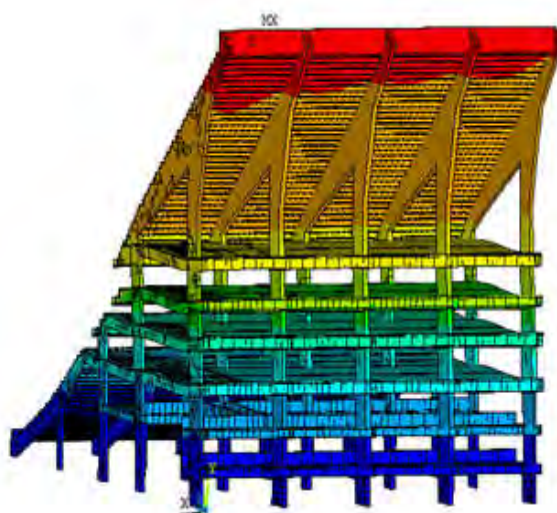
d) Vista lateral

Figura 112 - 1º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{01}=0,97\text{ Hz}$ )

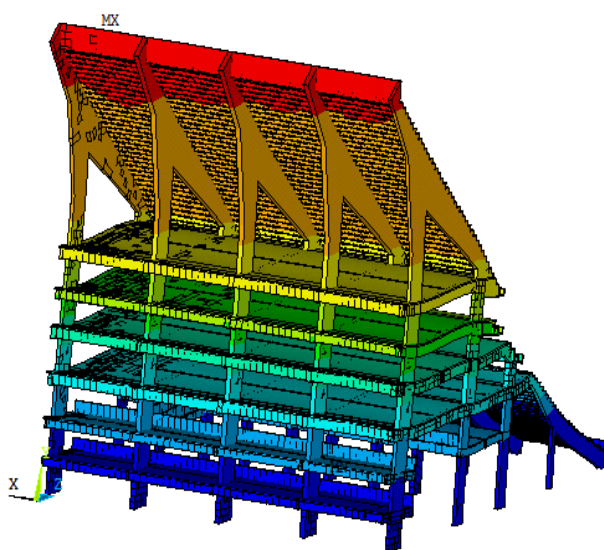




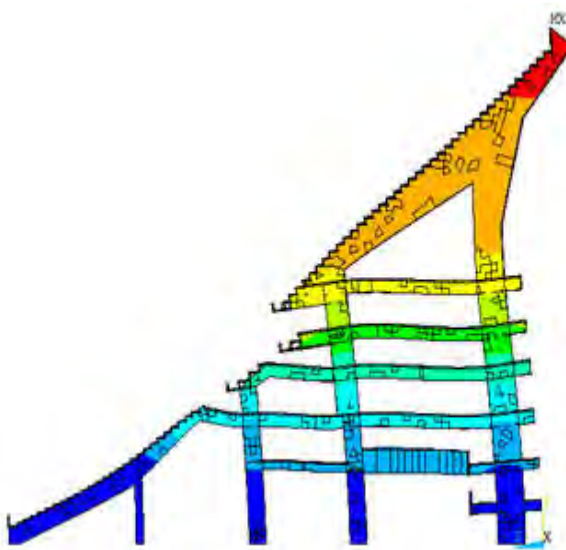
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás

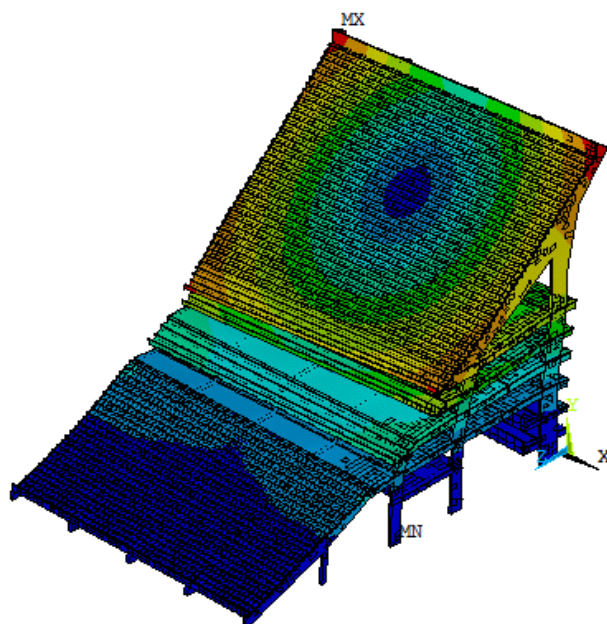


c) 2º vista isométrica de trás

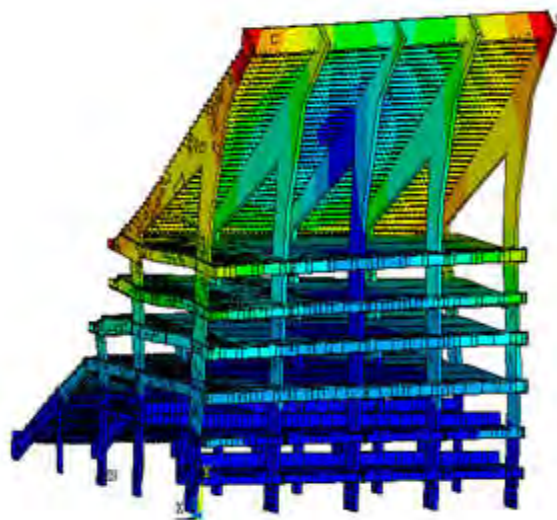


d) Vista lateral

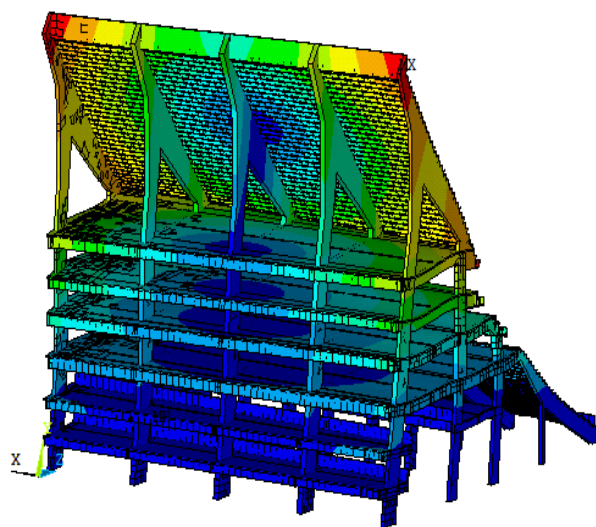
Figura 113 - 2º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{02}=2,28$  Hz)



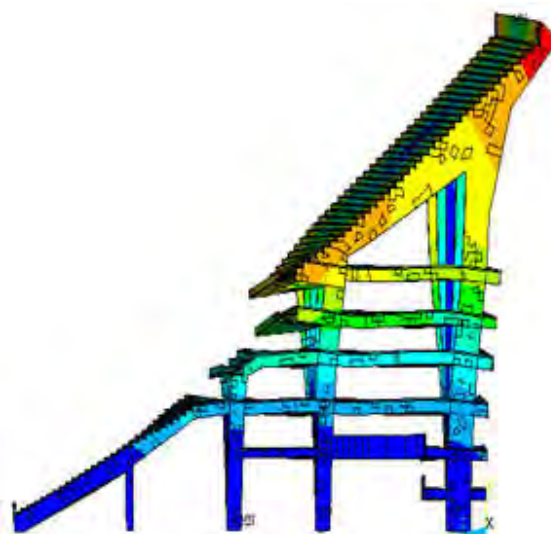
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás

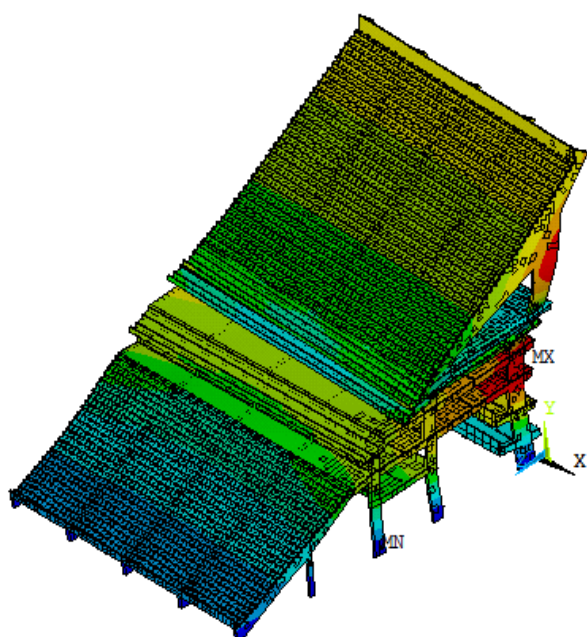


c) 2º vista isométrica de trás

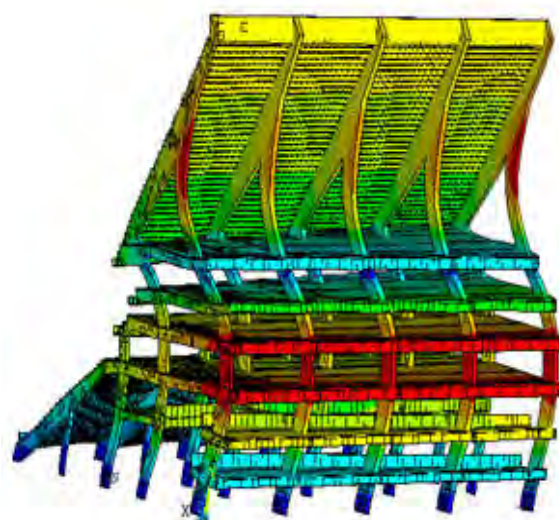


d) Vista lateral

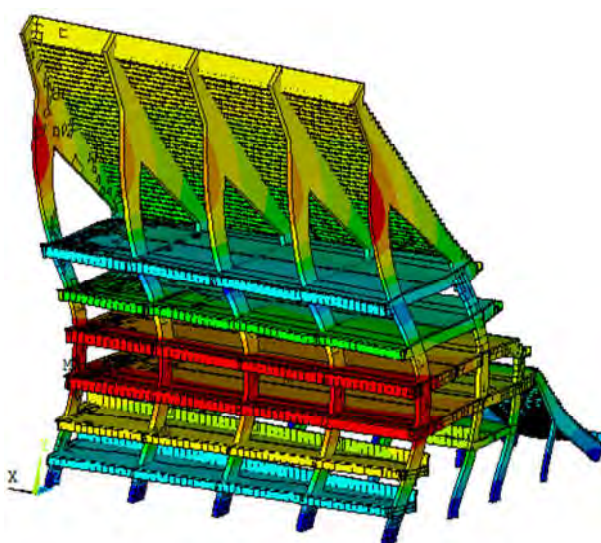
Figura 114 - 3º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{03}=2,47$  Hz)



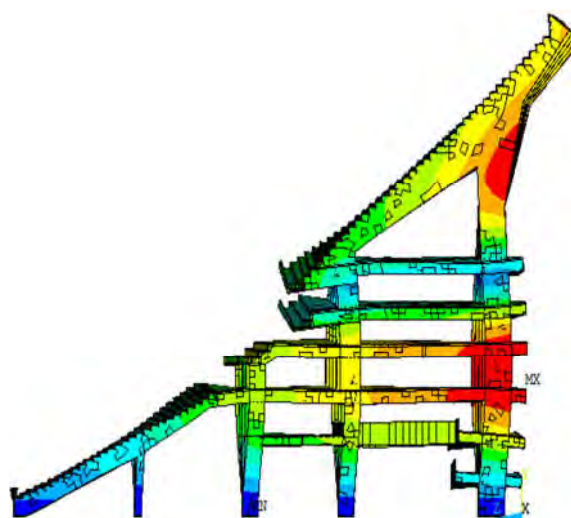
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás

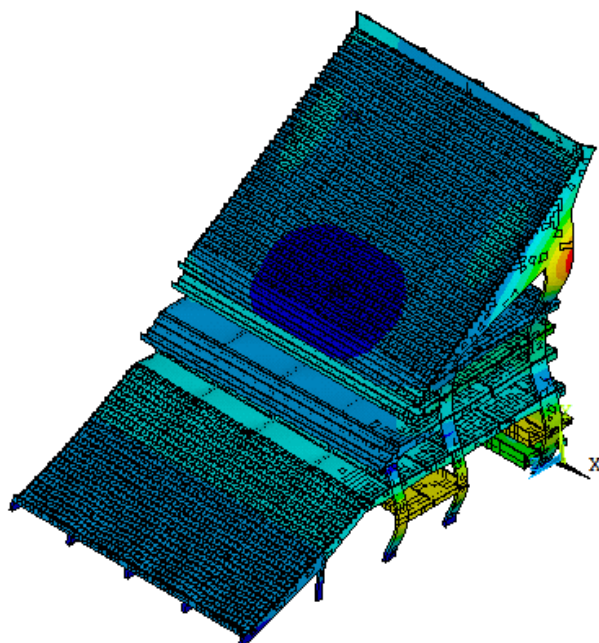


c) 2º vista isométrica de trás

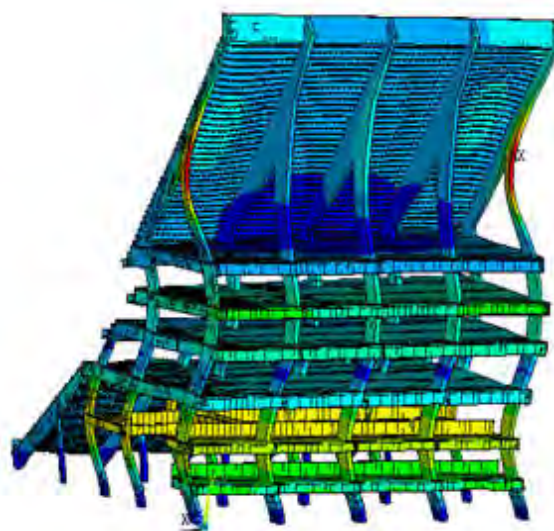


d) Vista lateral

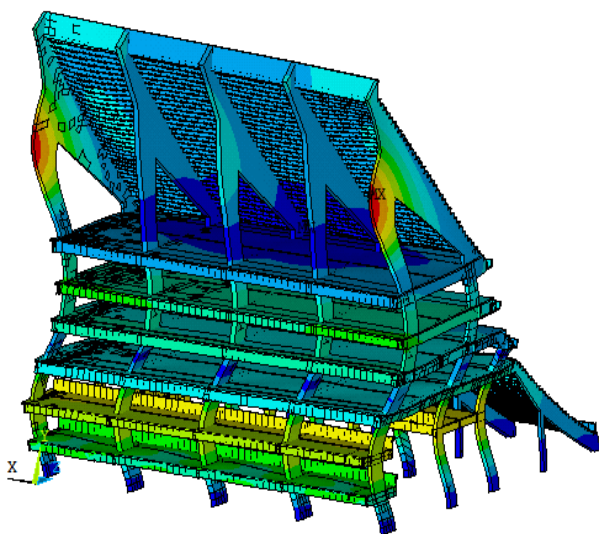
Figura 115 - 4º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{04}=2,83$  Hz)



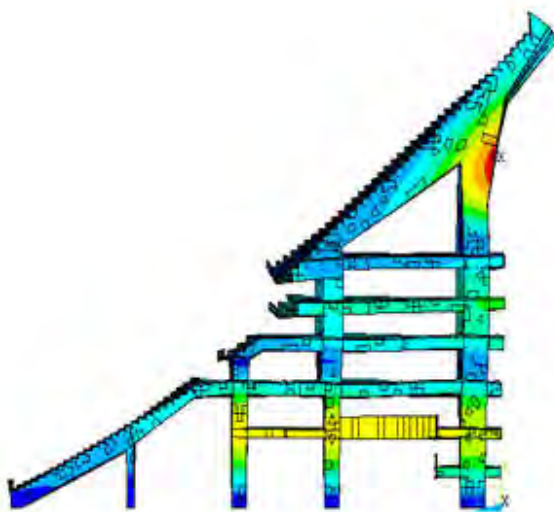
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás

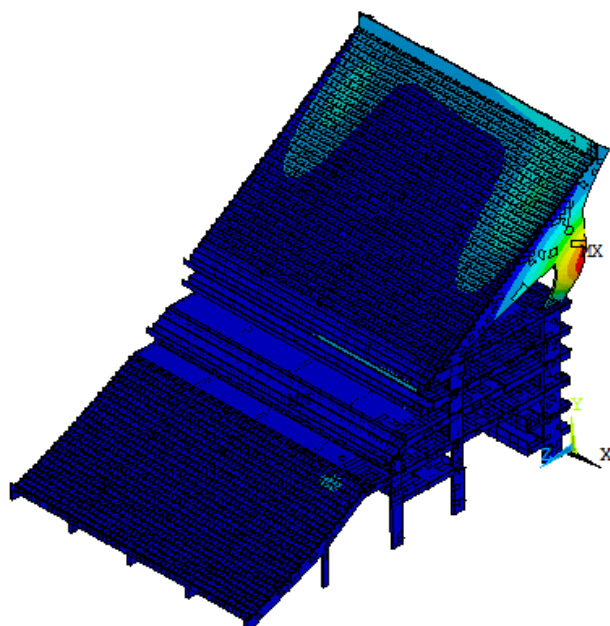


c) 2º vista isométrica de trás

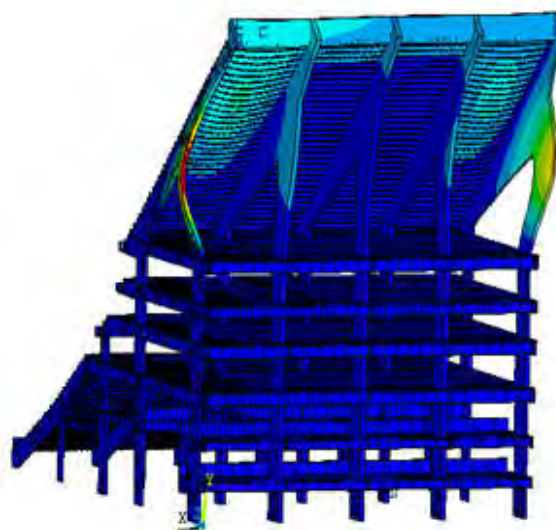


d) Vista lateral

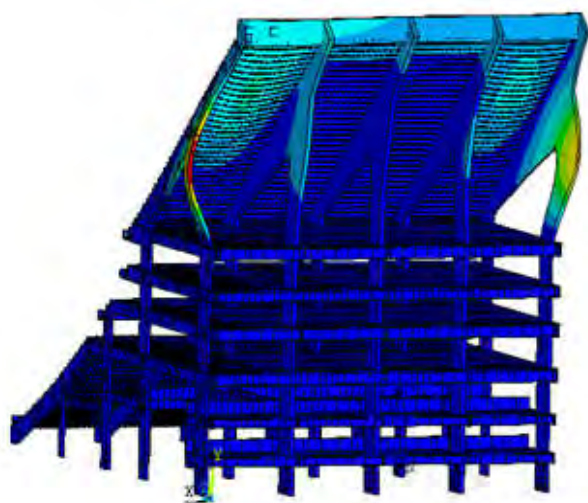
Figura 116 - 5º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{05}=5,12$  Hz)



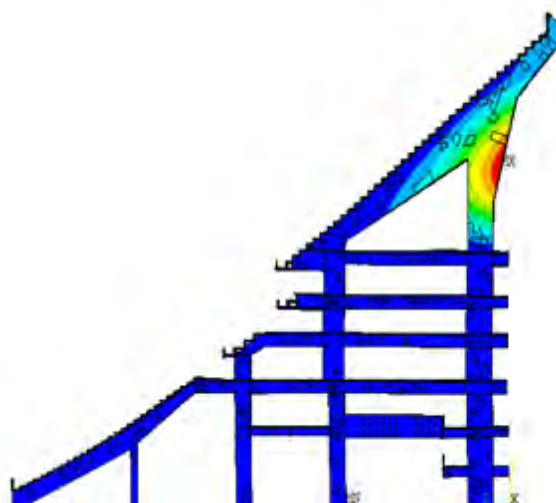
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás

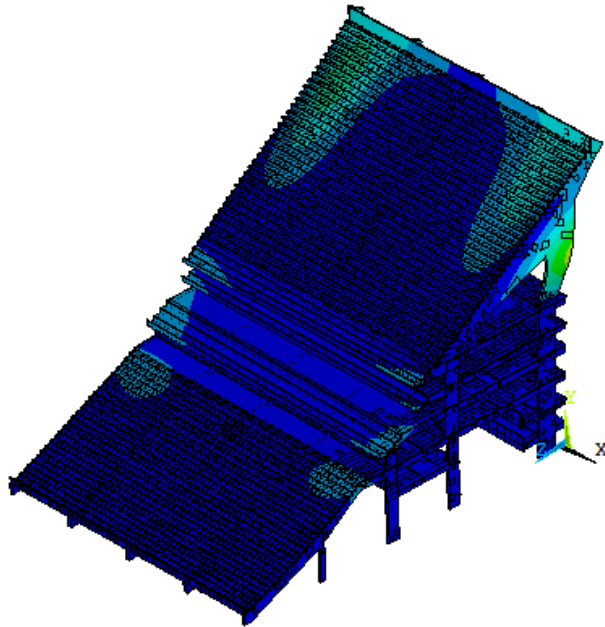


c) 2º vista isométrica de trás

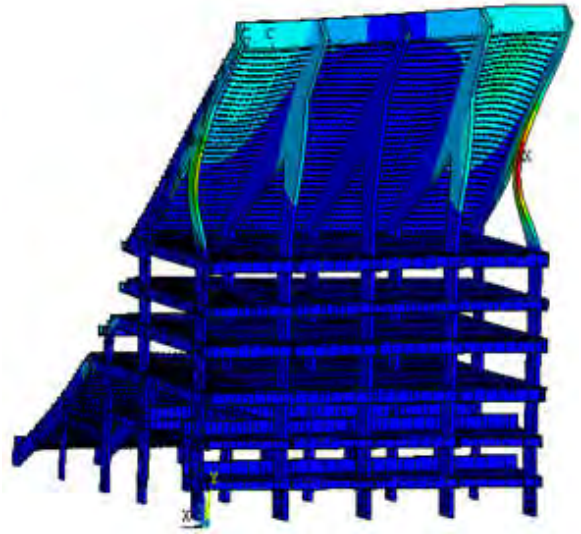


d) Vista lateral

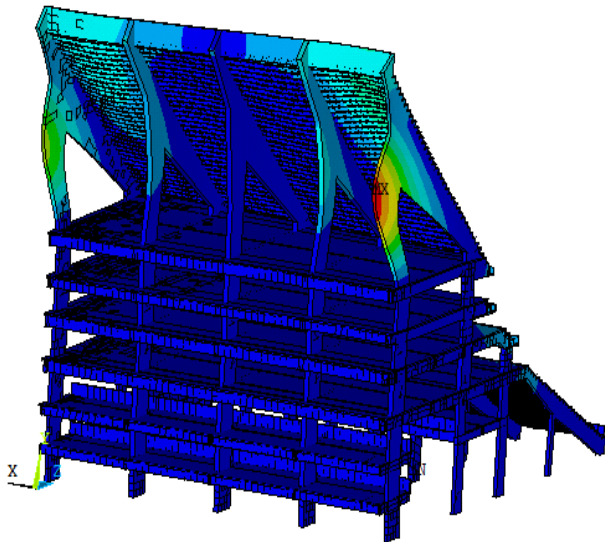
Figura 117 - 6º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{06}=5,50$  Hz)



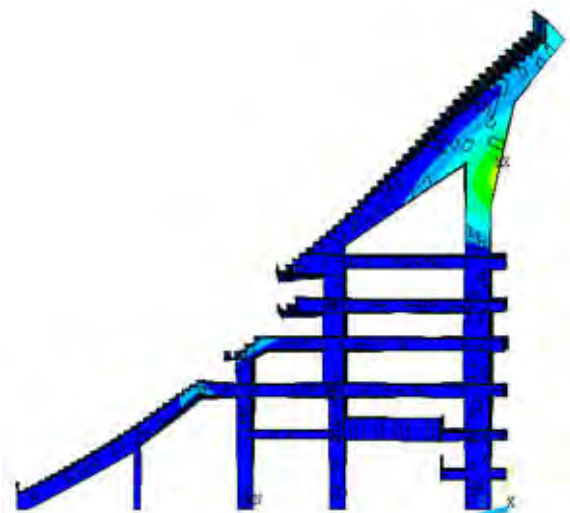
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás

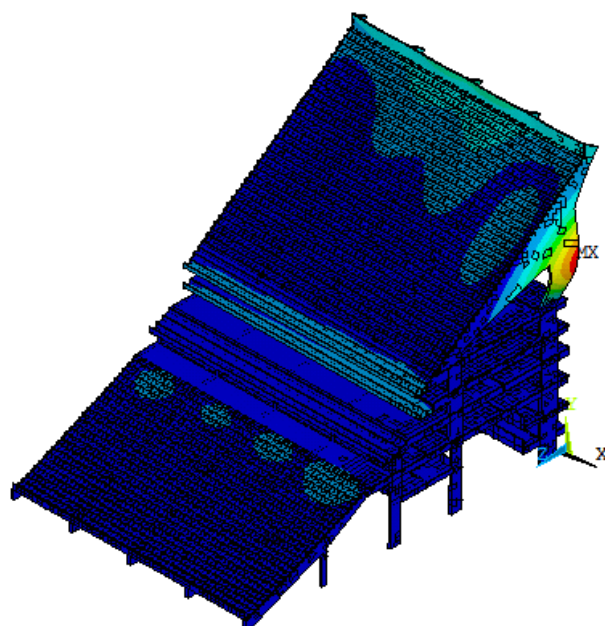


c) 2º vista isométrica de trás

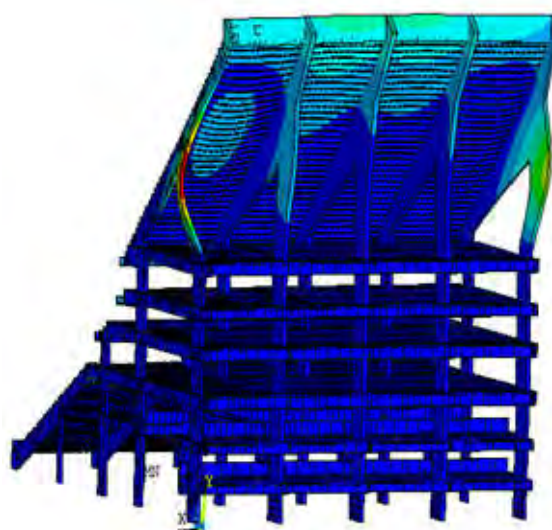


d) Vista lateral

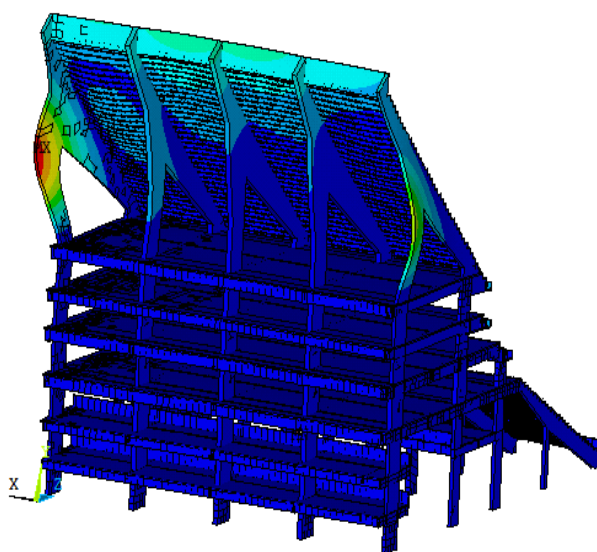
Figura 118 - 7º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{07}=5,57$  Hz)



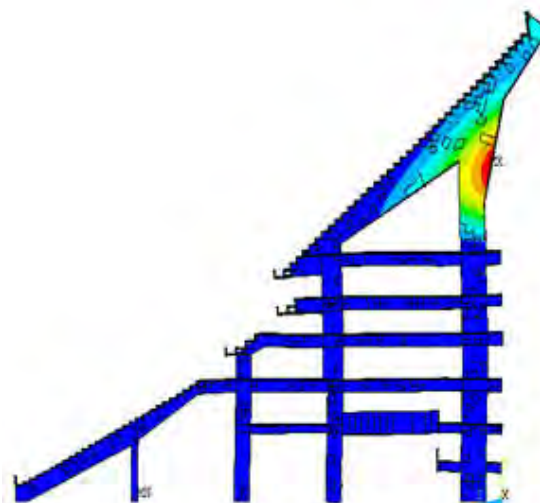
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás

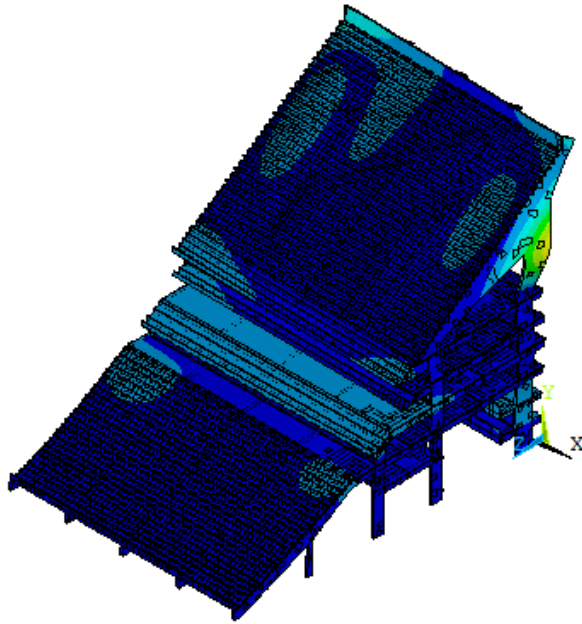


c) 2º vista isométrica de trás

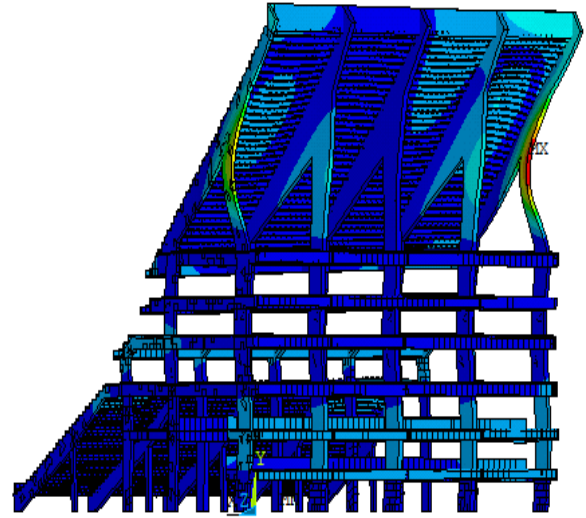


d) Vista lateral

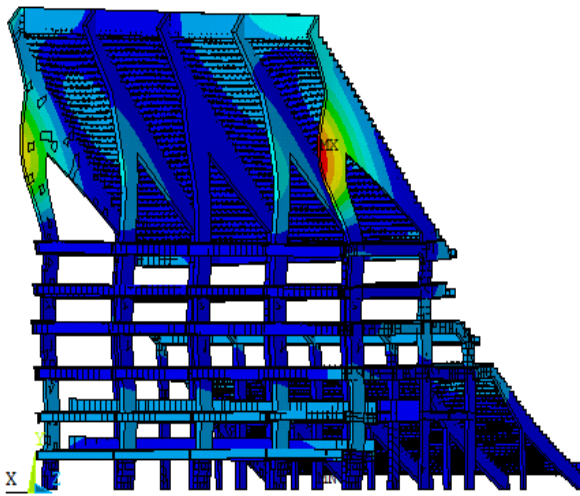
Figura 119 - 8º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{08}=5,70$  Hz)



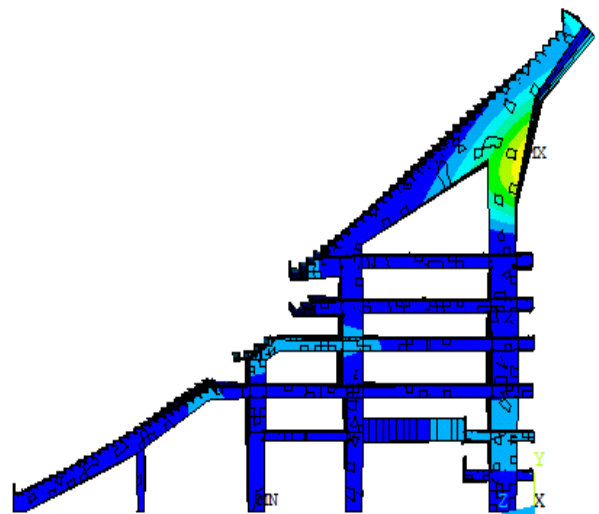
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás



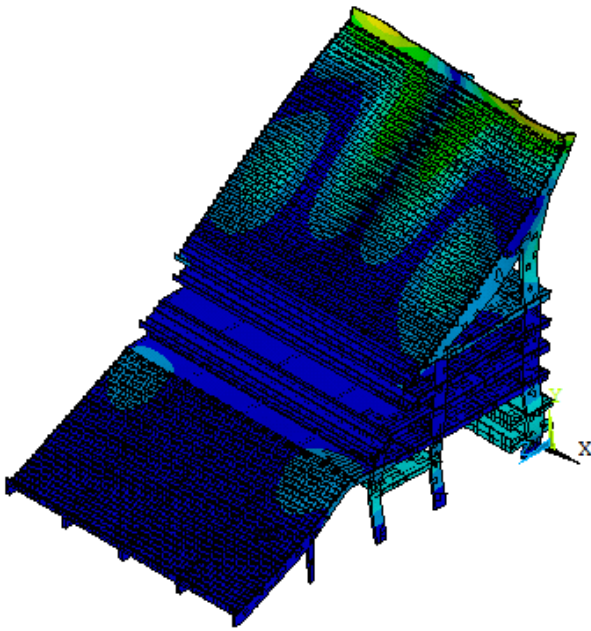
c) 2º vista isométrica de trás



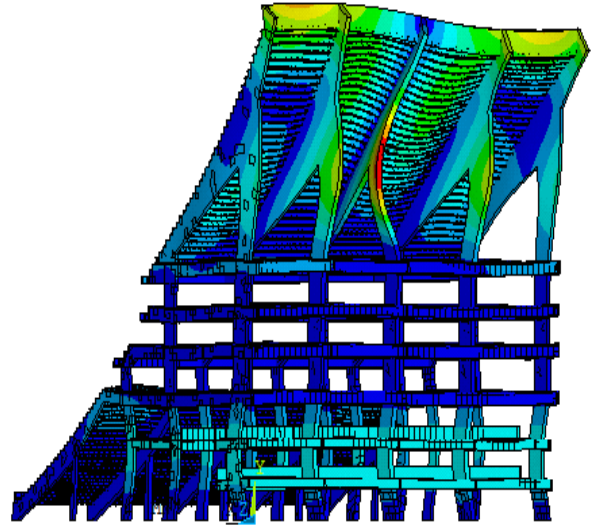
d) Vista lateral

Figura 120 - 9º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{09}=5,75$  Hz)

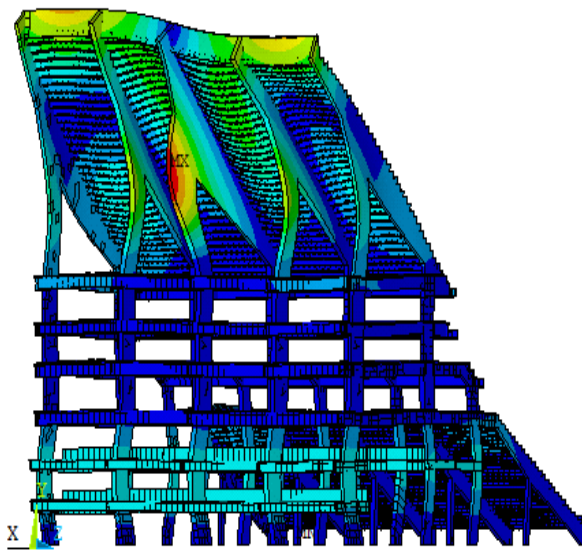




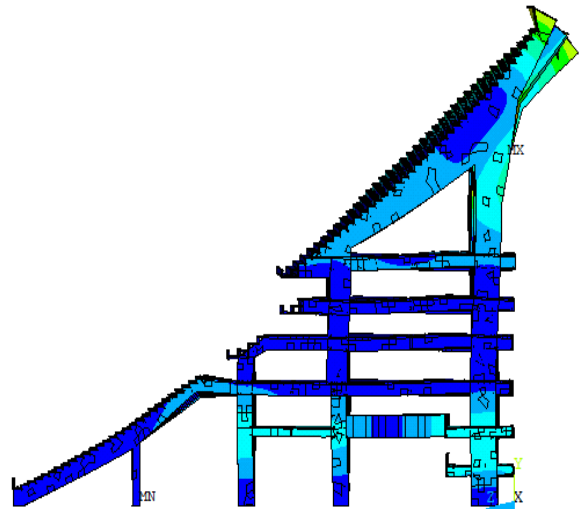
a) Vista isométrica frontal



b) 1º vista isométrica de trás



c) 2º vista isométrica de trás



d) Vista lateral

Figura 121 - 10º Modo de vibração do modelo estrutural ( $f_{10}=6,91$  Hz)

Tabela 25 - Descrição dos modos de vibração

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Descrição
$f_{01}$	0,9706	Flexão em relação ao eixo X (tangencial) e discreta torção em torno do eixo Y (vertical)
$f_{02}$	2,2859	Flexão em relação ao eixo Z (radial)
$f_{03}$	2,4699	Torção em torno do eixo Y (vertical)
$f_{04}$	2,8343	Flexão em relação ao eixo X (tangencial) e discreta torção em torno do eixo Y (vertical)
$f_{05}$	5,1202	Flexão em relação ao eixo X (tangencial) e discreta torção em torno do eixo Y (vertical)
$f_{06}$	5,4994	Flexão nos pilares em relação ao eixo X (tangencial) e na arquibancada superior
$f_{07}$	5,5713	Flexão nos pilares e na arquibancada superior em relação ao eixo X (tangencial), discreta flexão na arquibancada inferior em torno do eixo X (tangencial) e discreta torção em torno do eixo Y (vertical)
$f_{08}$	5,7020	Flexão nos pilares e na arquibancada superior em relação ao eixo X (tangencial), discreta flexão na arquibancada inferior em torno do eixo X (tangencial) e discreta torção em torno do eixo Y (vertical)
$f_{09}$	5,7464	Flexão nos pilares e na arquibancada superior em relação ao eixo X (tangencial), discreta flexão na arquibancada inferior em torno do eixo X (tangencial) e discreta torção em torno do eixo Y (vertical)
$f_{10}$	6,9100	Discreta flexão em relação ao eixo X (tangencial)

A NBR 6118 (2014) determina que, para assegurar um comportamento satisfatório dos sistemas estruturais sujeitos a vibrações, é necessário que a frequência natural da estrutura se afaste o máximo possível da  $f_{crítica}$ . Os valores de  $f_{crítica}$  estabelecidos pela referida norma variam de acordo com o tipo de estrutura (ver Tabela 9), sendo que para este trabalho foi adotado o valor de 8Hz.

Neste sentido, percebe-se que a frequência fundamental da arquibancada ( $f_{01}=0,97\text{Hz}$ ) está abaixo do valor mínimo de 9,6Hz ( $1,2f_{crítica} = 1,2 \times 8,0 = 9,6\text{Hz}$ ) recomendado pela NBR 6118 (2014). A análise modal realizada na arquibancada estudada revela, portanto, um indício de possíveis problemas relacionados a vibrações excessivas, principalmente, em caso de ressonância.

## 6.2 Análise das frequências naturais (autovalores) e dos modos de vibração (autovetores) considerando a arquibancada ocupada

Em diversos estudos (BROWNJOHN, 1999; CAPPELLINI, 2015; ELLIS; JI, 1997; HE et al., 2017; SALYARDS; FIRMAN III, 2011; SALYARDS; NOSS, 2014; SHAHABPOOR et al., 2017; SIM, 2006; TAKABATAKE, 1998) observaram a influência da presença do ser humano (efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura) sobre os parâmetros dinâmicos (parâmetros modais) dos sistemas estruturais (massa, rigidez e amortecimento). Há também a modificação nos valores das frequências naturais dos sistemas estruturais, a partir da alteração sobre os parâmetros dinâmicos.

Assim sendo, foram obtidos os valores das frequências naturais e dos parâmetros modais referentes aos dois primeiros modos de vibração da arquibancada investigada. Cabe ressaltar que o primeiro modo de vibração está relacionado à frequência fundamental da estrutura ( $f_{01}=0,97\text{Hz}$ ) e o segundo modo de vibração está relacionado à escolha da frequência de excitação do carregamento humano ( $f_{02}=2,28\text{Hz}$ ).

A ocupação das arquibancadas foi realizada por meio da modelagem biodinâmica, em que o ser humano foi representado parado e em pé. Isto é, apenas consideram-se as características dinâmicas humanas (massa, rigidez e amortecimento) obtidas no processo de otimização para os cem ensaios experimentais realizados. As Tabelas 26 e 27 ilustram os resultados obtidos.

Tabela 26 - Características do modelo estrutural com carregamento: 1º modo de vibração

Número de pessoas	Frequência (Hz)	Taxa de amortecimento $\xi$ (%)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)
0	0,97060	0,78	2464418,52	$9,165 \times 10^7$	$0,234 \times 10^8$
278	0,97055	1,84	2464416,30	$9,165 \times 10^7$	$0,553 \times 10^8$
556	0,97050	3,26	2464409,58	$9,164 \times 10^7$	$0,980 \times 10^8$
1112	0,97047	4,73	2464394,37	$9,163 \times 10^7$	$1,420 \times 10^8$
1668	0,97040	5,37	2464380,11	$9,162 \times 10^7$	$1,615 \times 10^8$
2223	0,97030	6,56	2464343,03	$9,160 \times 10^7$	$1,971 \times 10^8$
3021	0,97028	7,70	2464328,35	$9,159 \times 10^7$	$2,314 \times 10^8$
3677	0,97024	8,10	2464315,79	$9,158 \times 10^7$	$2,434 \times 10^8$
4161	0,97020	8,87	2464301,67	$9,157 \times 10^7$	$2,666 \times 10^8$

Tabela 27 - Características do modelo estrutural com carregamento: 2º modo de vibração

Número de pessoas	Frequência (Hz)	Taxa de amortecimento $\xi$ (%)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)
0	2,2859	0,78	2393856,18	$4,938 \times 10^8$	$0,534 \times 10^8$
278	2,2858	1,84	2393698,24	$4,937 \times 10^8$	$1,265 \times 10^8$
556	2,2857	3,26	2393503,17	$4,936 \times 10^8$	$2,242 \times 10^8$
1112	2,2856	4,73	2392797,86	$4,934 \times 10^8$	$3,248 \times 10^8$
1668	2,2855	5,37	2392624,35	$4,933 \times 10^8$	$3,693 \times 10^8$
2223	2,2851	6,56	2392449,66	$4,932 \times 10^8$	$4,506 \times 10^8$
3021	2,2849	7,70	2392303,47	$4,930 \times 10^8$	$5,289 \times 10^8$
3677	2,2845	8,10	2392004,96	$4,928 \times 10^8$	$5,562 \times 10^8$
4161	2,2844	8,87	2391686,72	$4,927 \times 10^8$	$6,093 \times 10^8$

Com base nos resultados fornecidos pelas Tabelas 26 e 27, verifica-se que ocorre uma diminuição nos valores da frequência natural, da massa modal e da rigidez modal, além do aumento na taxa de amortecimento e, conseqüente, aumento no valor do amortecimento modal.

Cabe ressaltar que a variação numérica obtida nos valores da frequência natural, da massa modal e da rigidez modal foi pouco expressiva e inferior a 1%. Por outro lado, a influência na taxa de amortecimento é mais significativa, da ordem de 10%.

Verificou-se que, para a arquibancada estudada, a relação  $M_p/M_e$  ( $M_p$ : massa das pessoas;  $M_e$ : massa das arquibancadas), considerando-se apenas uma pessoa ( $m=74\text{kg}$ ) sobre a estrutura é igual a 0,00005. Essa relação ao se considerar a ocupação de 4.161 pessoas sobre a estrutura (100% de ocupação em todos os setores das arquibancadas) é igual a 0,20.

Takabatake (1998), em seu estudo, verificou que ao se considerar a massa de um ser humano igual a 65kg, sobre uma laje de concreto, de massa igual a 720.600kg, foi obtida uma relação  $M_p/M_e$  igual a 0,00009. O autor concluiu que o efeito da massa de um ser humano nessa estrutura era insignificante.

A partir dos resultados obtidos, ressaltar-se a necessidade de realização de ensaios experimentais sobre o sistema estrutural real para a consolidação dos valores obtidos de acordo com a metodologia de análise desenvolvida neste trabalho de pesquisa, os quais estão em consonância com os resultados obtidos por diversos autores (BROWNJOHN, 1999; CAPPELLINI, 2015; ELLIS; JI, 1997; HE et al., 2017; SALYARDS; NOSS, 2014; SHAHABPOOR et al., 2017; SIM, 2006).

### 6.3 Influência da ocupação da arquibancada nas frequências naturais

As Figuras 122 e 123 ilustram graficamente a influência da relação  $M_p/M_e$  ( $M_p$ : massa das pessoas;  $M_e$ : massa das arquibancadas), na frequência natural, para os dois primeiros modos de vibração da arquibancada. Cabe ressaltar que nas Figuras 122 e 123 essa relação é representada pela letra R.

Os gráficos foram gerados a partir de resultados de análises de vibração livre realizadas no programa ANSYS (2009), ou seja, sem a presença de carregamento

que varie ao longo do tempo, em que o ser humano parado e em pé foi representado por sistemas biodinâmicos.

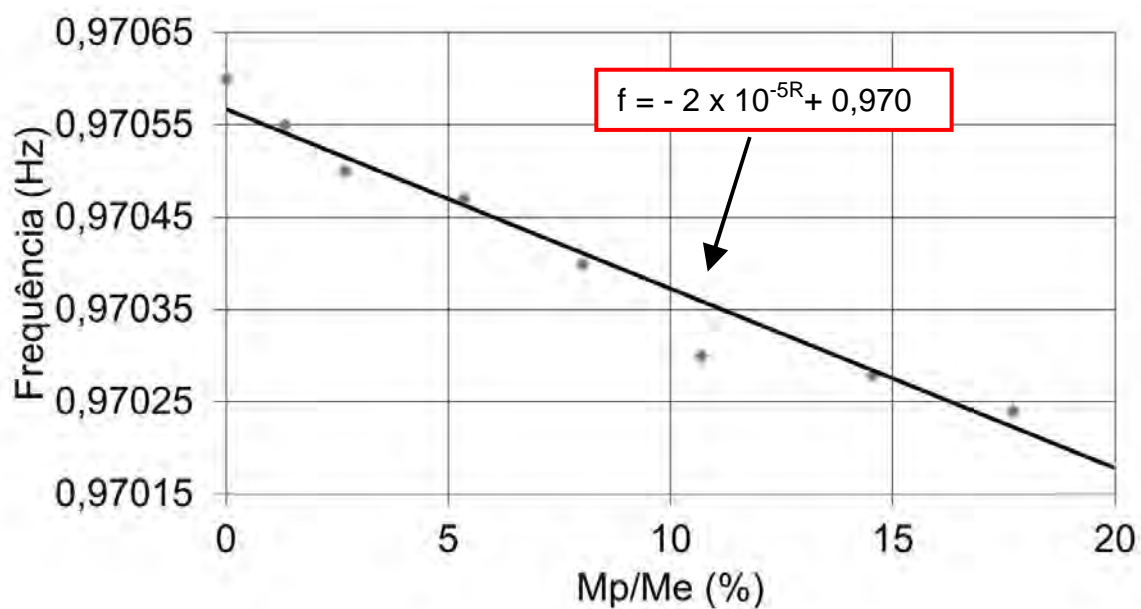


Figura 122 - Variação da frequência natural devido à presença das pessoas: 1º modo de vibração

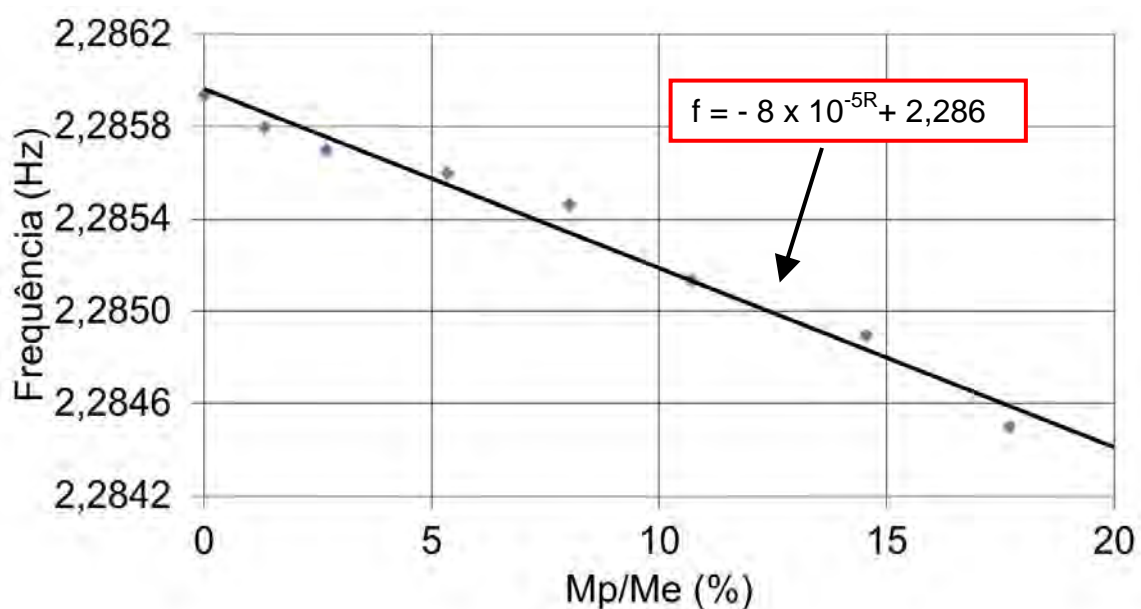


Figura 123 - Variação da frequência natural devido à presença das pessoas: 2º modo de vibração

Mais uma vez, verifica-se que o valor da frequência natural diminui à medida que ocorre um aumento na quantidade de pessoas ocupando a arquibancada. Cabe ressaltar, que conforme citado na seção 6.2, essa variação numérica observada foi pouco expressiva e inferior a 1%.

Na literatura técnica, a redução no valor da frequência natural também se faz presente. Um estudo que pode ser citado é o de Ellis e Ji (1997), que avalia o comportamento da arquibancada de um estádio localizado em Twickenham, no Reino Unido, onde os autores relatam que há uma redução nos valores das três primeiras frequências naturais da estrutura ao comparar os valores obtidos quando a arquibancada se encontrava vazia com os valores obtidos quando a mesma estava completamente ocupada. He et al. (2017) também constataram, a partir da investigação da interação homem-estrutura em uma passarela com frequência fundamental de 2,83Hz, que a frequência natural fundamental da estrutura foi alterada devido ao envolvimento humano.

#### 6.4 Influência da ocupação da arquibancada no amortecimento estrutural

A Figura 124 ilustra a influência da relação  $M_p/M_e$  ( $M_p$ : massa das pessoas;  $M_e$ : massa das arquibancadas), representada pela letra R, no amortecimento estrutural. A referida relação possibilitou a avaliação do comportamento do amortecimento estrutural na resposta dinâmica da arquibancada.

A partir da realização de análises transientes no programa ANSYS (2009), foram gerados os sinais de deslocamento no domínio do tempo. A ocupação das arquibancadas foi realizada por meio de sistemas biodinâmicos, em que o ser humano foi representado parado e em pé. Utilizou-se o decremento logarítmico para se determinar a razão de amortecimento estrutural para cada ocupação da arquibancada, como pode ser visto nas equações (38) e (39), respectivamente.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} \quad (38)$$

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (39)$$

Onde  $\delta$ : decremento logarítmico;  $n$ : número de picos;  $x_n$ : amplitude do primeiro pico;  $x_{n+1}$ : amplitude do próximo pico;  $\xi$ : taxa de amortecimento estrutural.

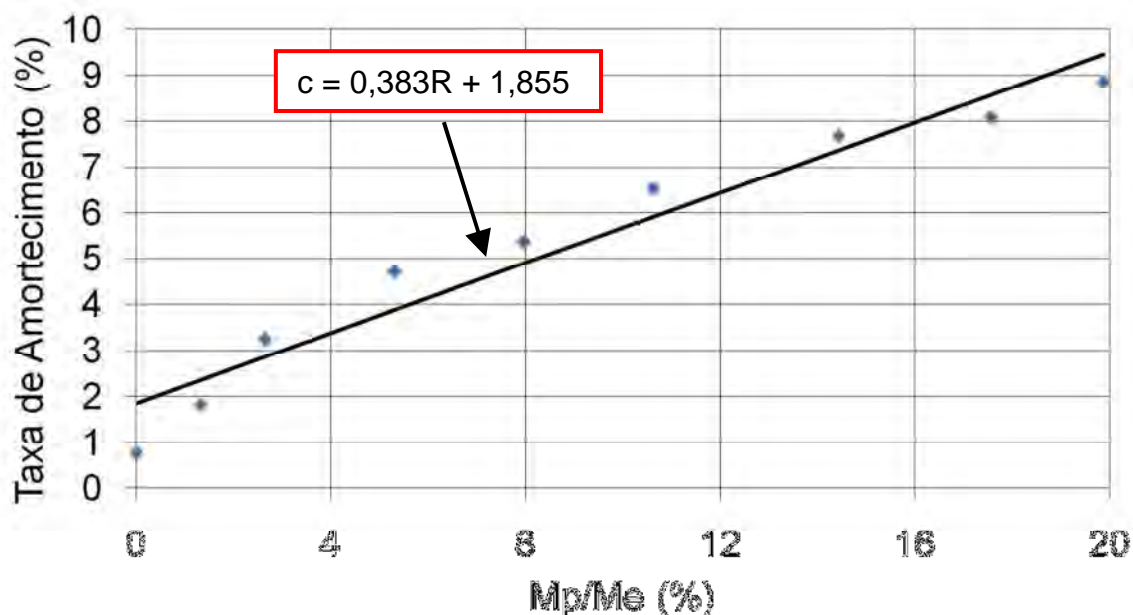


Figura 124 - Variação da taxa de amortecimento estrutural devido a presença das pessoas

Com base nos resultados apresentados na Figura 124, verifica-se que o amortecimento estrutural aumenta significativamente à medida que se aumenta a ocupação da estrutura, confirmando a importância da modelagem biodinâmica para a representação das pessoas na avaliação da resposta dinâmica da arquibancada. Esse aumento no amortecimento modal foi da ordem de 10%.

Na literatura técnica, como por exemplo, no trabalho de Shahabpoor et al. (2017), que investigou os efeitos causados pela ocupação humana sobre as propriedades modais do sistema estrutural, foi constatado o aumento da taxa de amortecimento de 0,60%, quando a estrutura estava vazia, para 2,60%, quando 10 pessoas estavam ocupando a estrutura.

## 6.5 Considerações do capítulo

Os resultados das análises modais realizadas foram apresentados no presente capítulo. A primeira avaliação foi realizada para a estrutura vazia, onde foram obtidos os modos de vibração, além dos valores encontrados para as



frequências naturais, massa modal, rigidez modal e amortecimento modal. Posteriormente, realizou-se uma análise de vibração livre a partir da consideração da ocupação das arquibancadas através da utilização de sistemas biodinâmicos, em que o ser humano é representado parado e em pé, ou seja, apenas considerando as características dinâmicas humanas (massa, rigidez e amortecimento). Por fim, foi realizado um estudo mais detalhado a cerca da influência da presença do ser humano nos valores das frequências naturais do primeiro e do segundo modo de vibração e do amortecimento modal.

## 7 ANÁLISE TRANSIENTE E ESTUDO DO CONFORTO HUMANO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise de vibração forçada (análise transiente) da arquibancada, com base na utilização do programa computacional ANSYS (2009). Essa análise tem o objetivo de avaliar o comportamento do sistema estrutural quando o mesmo encontra-se submetido a ações dinâmicas provenientes da prática de atividade humana rítmica (torcida).

Neste trabalho, conforme mencionado na seção 2.1, avaliou-se o comportamento da arquibancada através da simulação do carregamento dinâmico humano com frequência de excitação 2,20Hz.

Considerando a necessidade da resposta dinâmica das arquibancadas ser avaliada na fase permanente da resposta do sistema, o tempo total para a realização dessa análise foi de 20s e o intervalo de integração ( $\Delta t$ ) utilizado foi igual a 0,002s ( $\Delta t = 2 \times 10^{-3}$ s).

### 7.1 Definição das situações de carregamento (sistemas biodinâmicos)

A definição das situações de carregamento foi realizada tomando como base situações reais de carregamento, que foram constatadas através de visualizações de arquibancadas *in loco*, com idas a jogos em estádios de futebol, como por exemplo, nos Estádios do Maracanã, Nilton Santos e também no Mané Garrincha. Verificou-se que existem jogos com menor apelo de torcida, onde as arquibancadas ficam mais vazias. Inclusive, há situações em que apenas alguns setores são liberados para a ocupação da torcida. Portanto, além de simulações de situações que consideraram 100% de ocupação nos setores da arquibancada, também foram avaliadas outras situações de carregamento com taxas de ocupação menores.

A Tabela 28 apresenta a descrição das dezesseis diferentes situações de carregamentos avaliadas. A influência do número de pessoas sobre a resposta dinâmica do sistema estrutural e a influência dos modelos biodinâmicos que atuam sobre a estrutura foram verificadas a partir da avaliação dessas situações de carregamento. As Figuras 125 a 140 ilustram cada situação de carregamento estudada.

Tabela 28 - Situações de carregamento investigadas

Situações	Carregamentos
SC-1	12,5% de ocupação somente sobre a arquibancada superior (278 pessoas)
SC-2	25% de ocupação somente sobre a arquibancada superior (556 pessoas)
SC-3	50% de ocupação somente sobre a arquibancada superior (1.112 pessoas)
SC-4	75% de ocupação somente sobre a arquibancada superior (1.668 pessoas)
SC-5	100% de ocupação somente sobre a arquibancada superior (2.223 pessoas)
SC-6	12,5% de ocupação somente sobre o camarote (43 pessoas)
SC-7	25% de ocupação somente sobre o camarote (86 pessoas)
SC-8	50% de ocupação somente sobre o camarote (171 pessoas)
SC-9	75% de ocupação somente sobre o camarote (257 pessoas)
SC-10	100% de ocupação somente sobre o camarote (342 pessoas)
SC-11	12,5% de ocupação somente sobre a arquibancada inferior (200 pessoas)
SC-12	25% de ocupação somente sobre a arquibancada inferior (399 pessoas)
SC-13	50% de ocupação somente sobre a arquibancada inferior (798 pessoas)
SC-14	75% de ocupação somente sobre a arquibancada inferior (1.197 pessoas)
SC-15	100% de ocupação somente sobre a arquibancada inferior (1.596 pessoas)
SC-16	100% de ocupação sobre todas as arquibancadas (4.161 pessoas)

O Apêndice D apresenta os valores de massa, rigidez e amortecimento das pessoas consideradas na modelagem dos sistemas biodinâmicos para cada uma das situações de carregamento. Cabe ressaltar que as Tabelas 69 a 72 do Apêndice D apresentam os valores de massa, rigidez e amortecimento das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios experimentais, que foram utilizados nas situações de carregamento SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16. Uma vez que as referidas situações ultrapassam a quantidade de 100 (Cem) pessoas ocupando o sistema estrutural, foi

necessário replicar os resultados obtidos para as 100 (Cem) pessoas de forma a alcançar a ocupação considerada para cada situação de carregamento. Pode-se tomar como exemplo dessa replicação necessária, a situação de carregamento SC-1 (12,5% de taxa de ocupação sobre a arquibancada superior: 278 pessoas), onde os resultados aplicados para a 101ª pessoa correspondem aos resultados da 1ª pessoa, para a 102ª pessoa correspondem aos resultados da 2ª pessoa e assim sucessivamente.

As Tabelas 73 e 74 do Apêndice D apresentam os valores de massa, rigidez e amortecimento de 43 (Quarenta e três) pessoas participantes dos ensaios experimentais, que foram utilizados na situação de carregamento SC-6, que apresenta 43 pessoas ocupando o sistema estrutural. As Tabelas 75 a 78 do Apêndice D apresentam os valores de massa, rigidez e amortecimento de 86 (Oitenta e seis) pessoas participantes dos ensaios experimentais, que foram utilizados na situação de carregamento SC-7, que apresenta 86 pessoas ocupando o sistema estrutural.

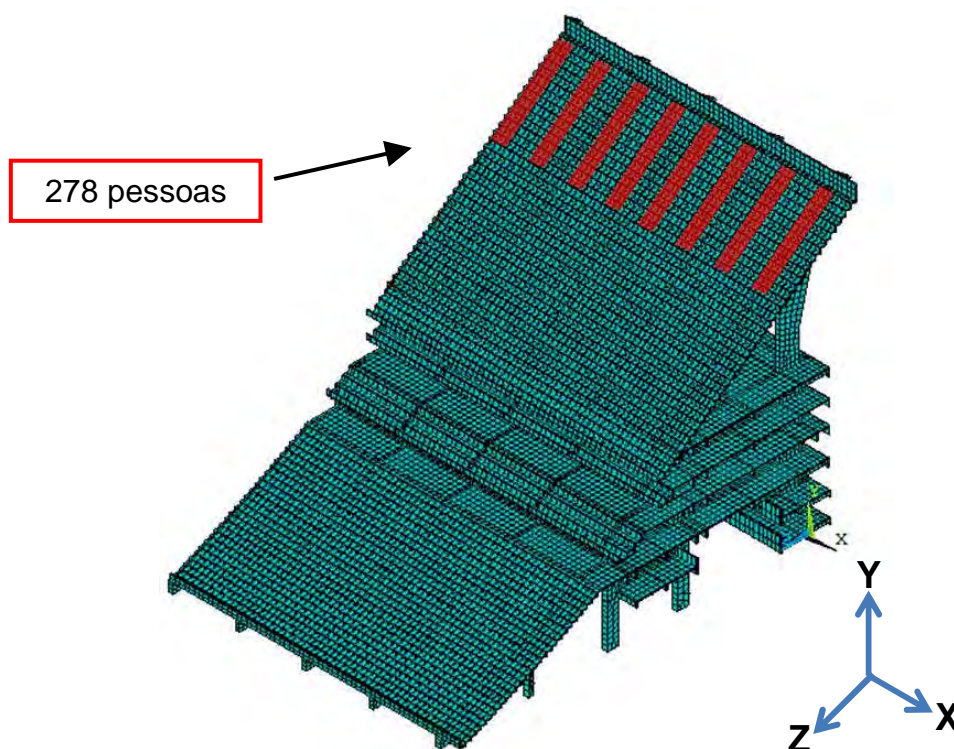


Figura 125 - Situação de carregamento SC-1

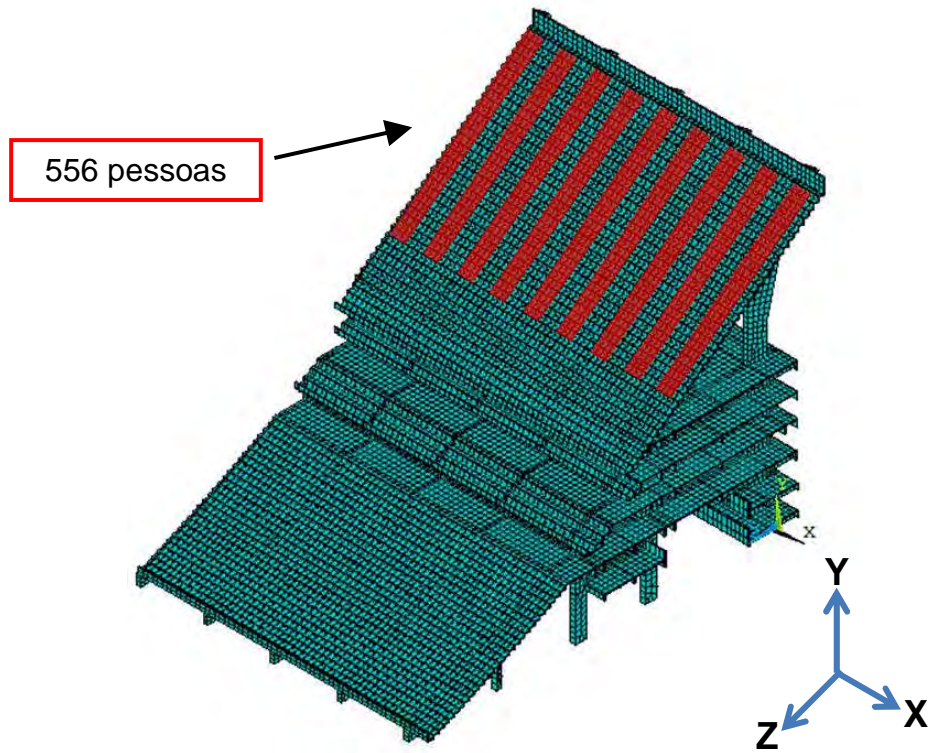


Figura 126 - Situação de carregamento SC-2

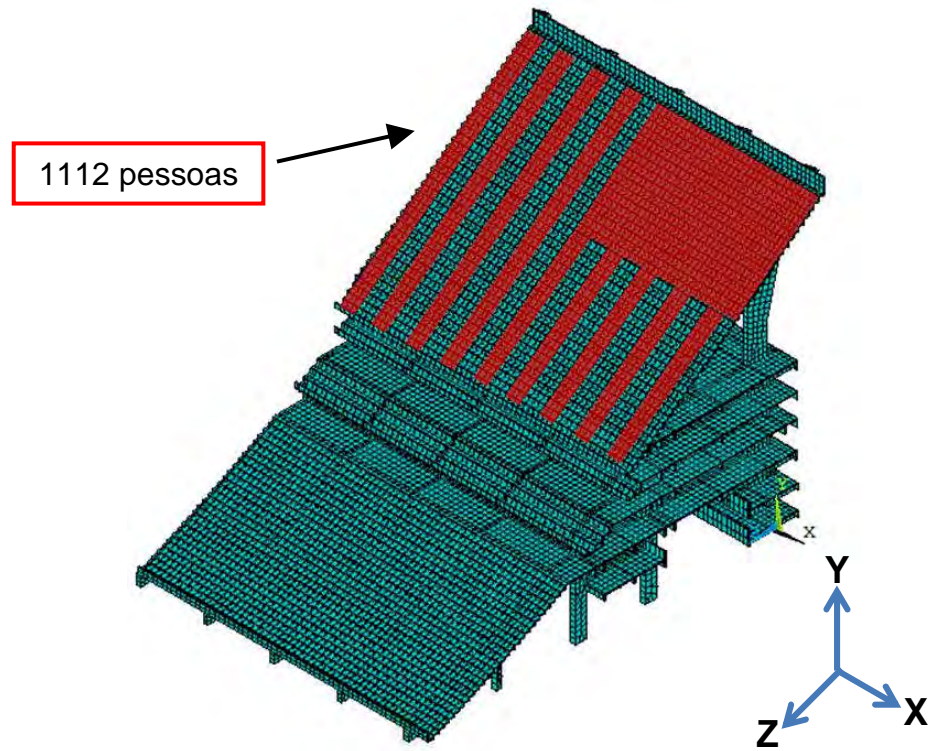


Figura 127 - Situação de carregamento SC-3

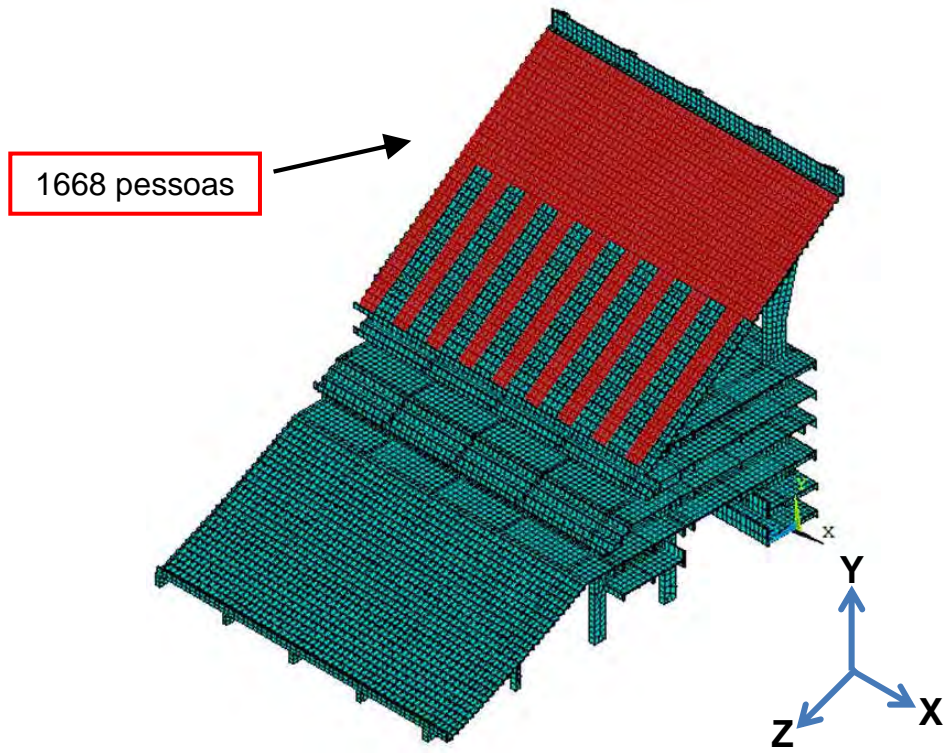


Figura 128 - Situação de carregamento SC-4

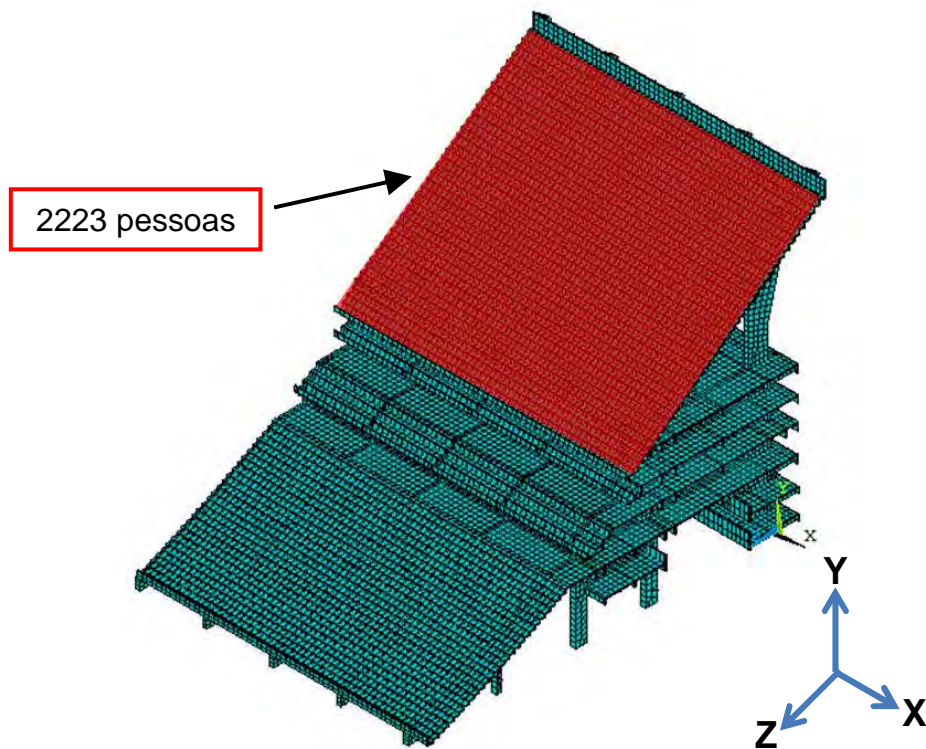


Figura 129 - Situação de carregamento SC-5

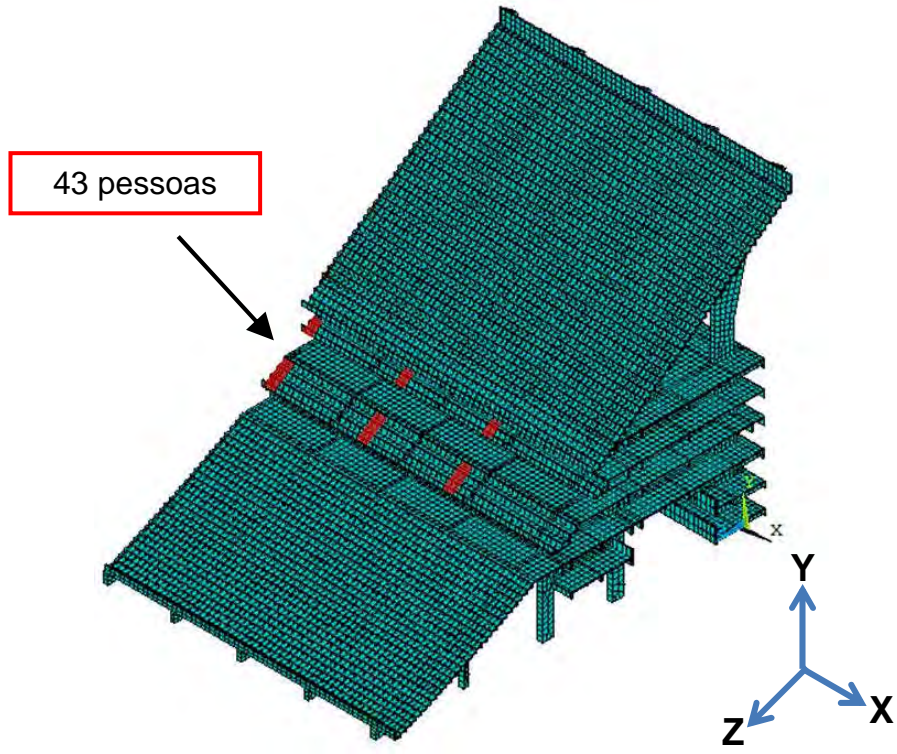


Figura 130 - Situação de carregamento SC-6

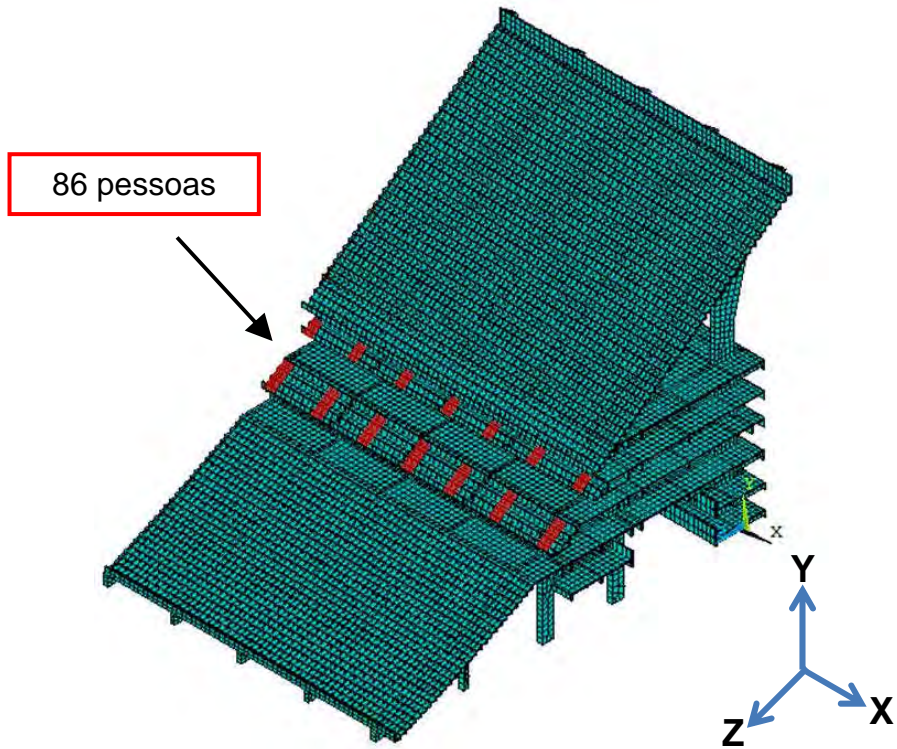


Figura 131 - Situação de carregamento SC-7

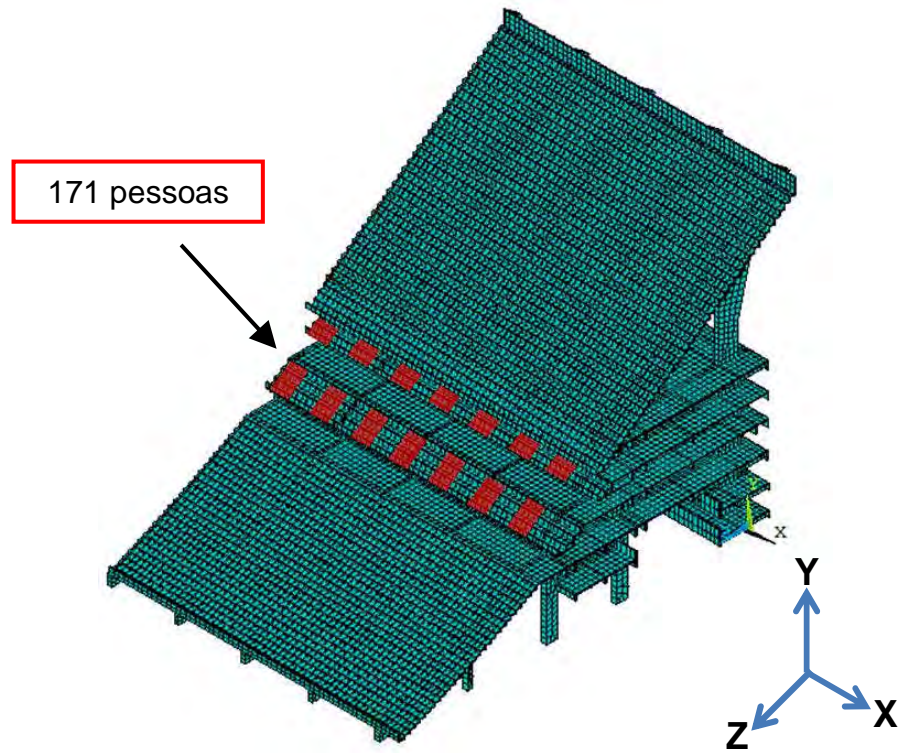


Figura 132 - Situação de carregamento SC-8

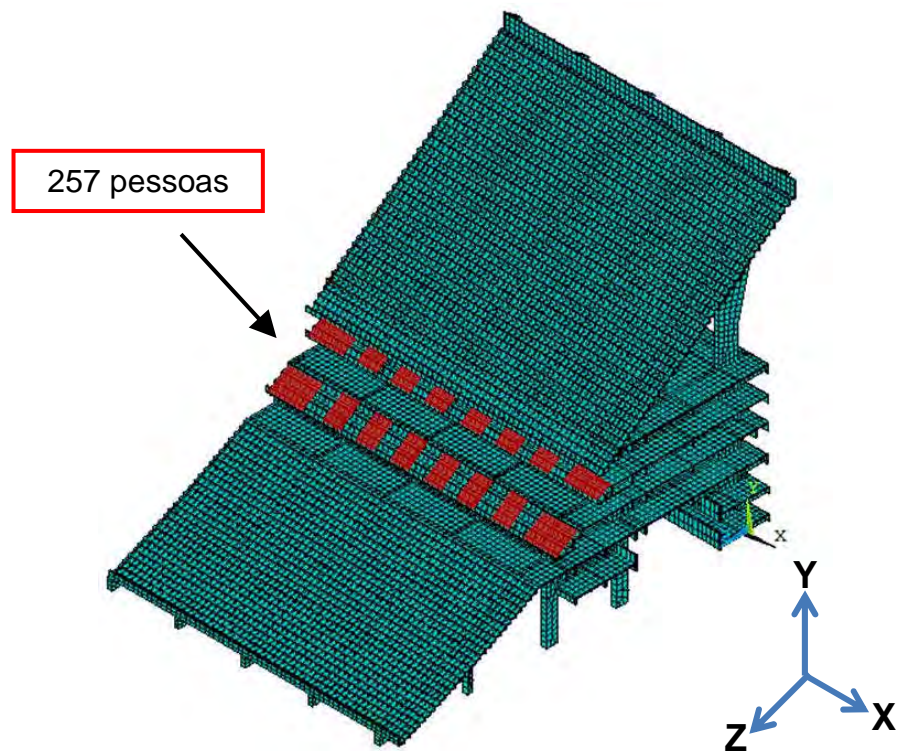


Figura 133 - Situação de carregamento SC-9



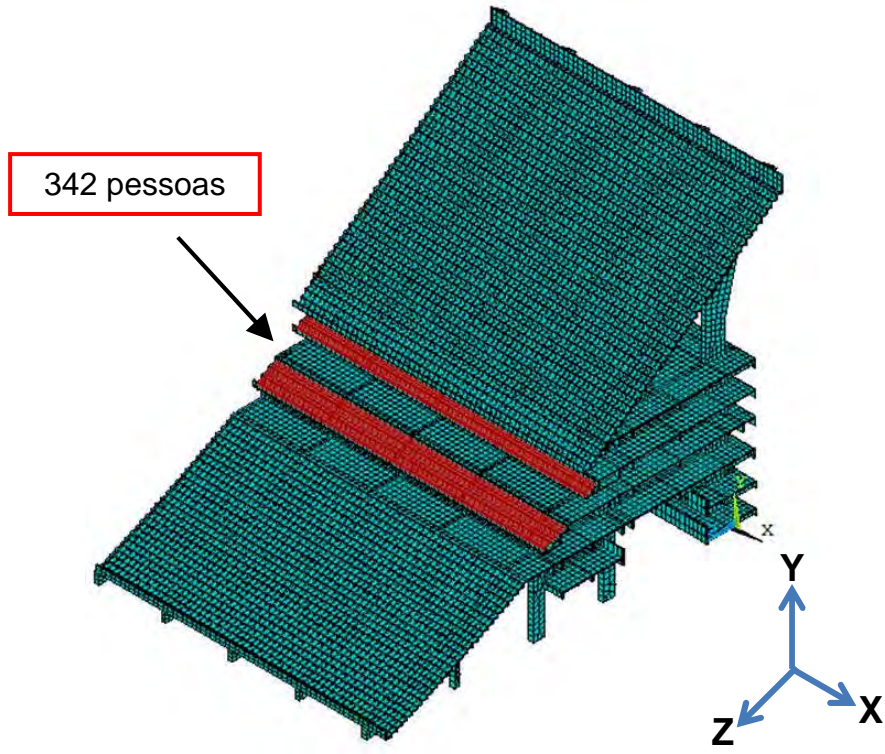


Figura 134 - Situação de carregamento SC-10

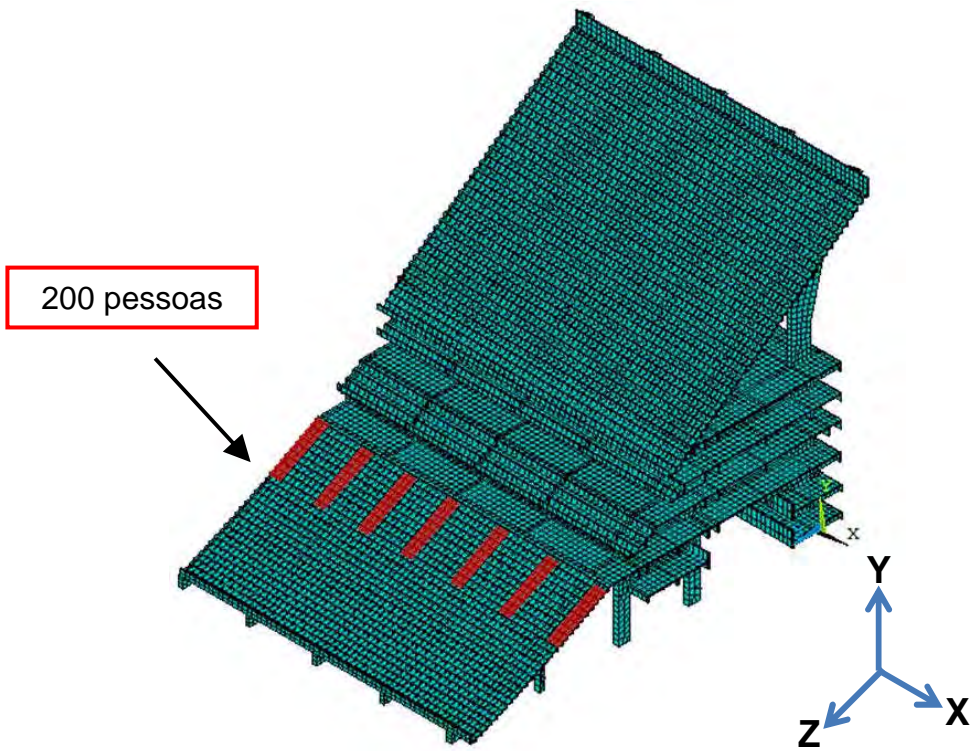


Figura 135 - Situação de carregamento SC-11

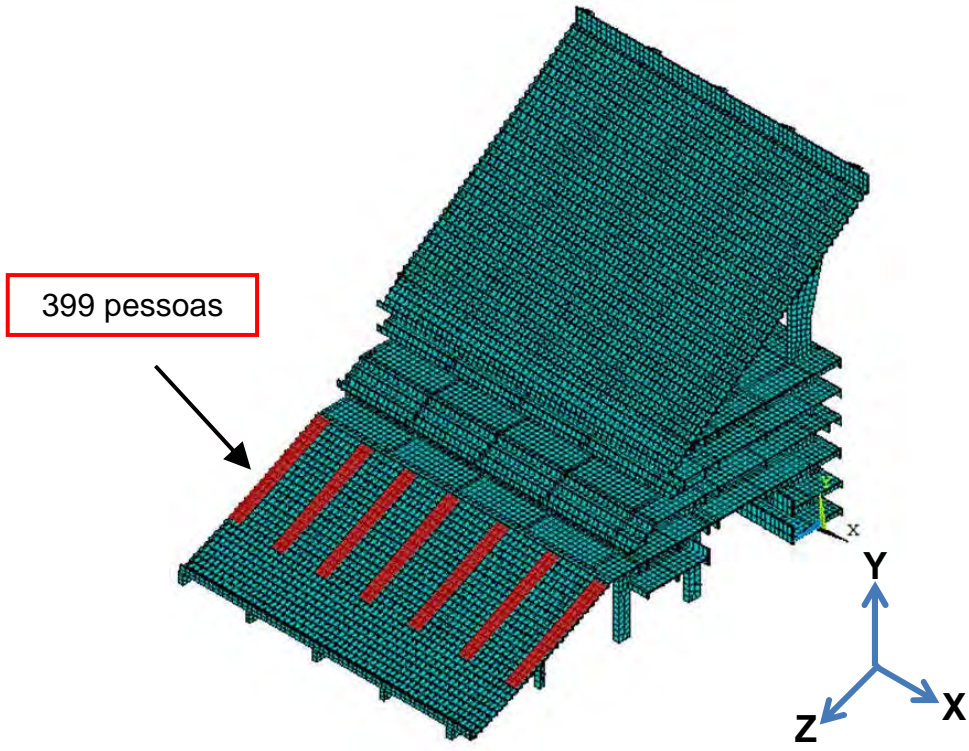


Figura 136 - Situação de carregamento SC-12

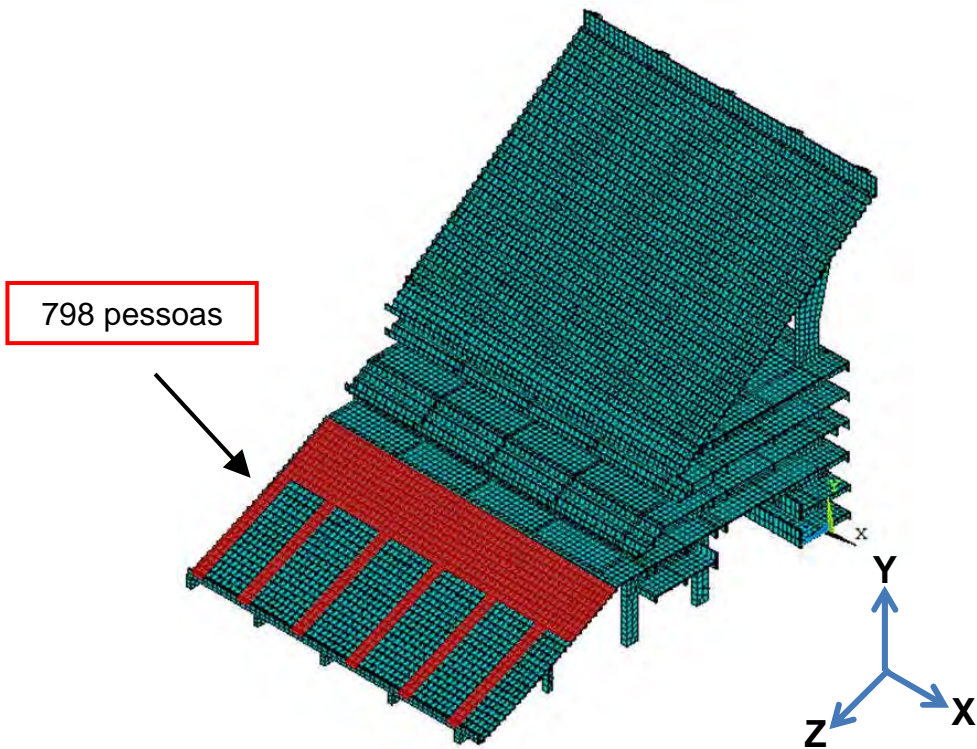


Figura 137 - Situação de carregamento SC-13

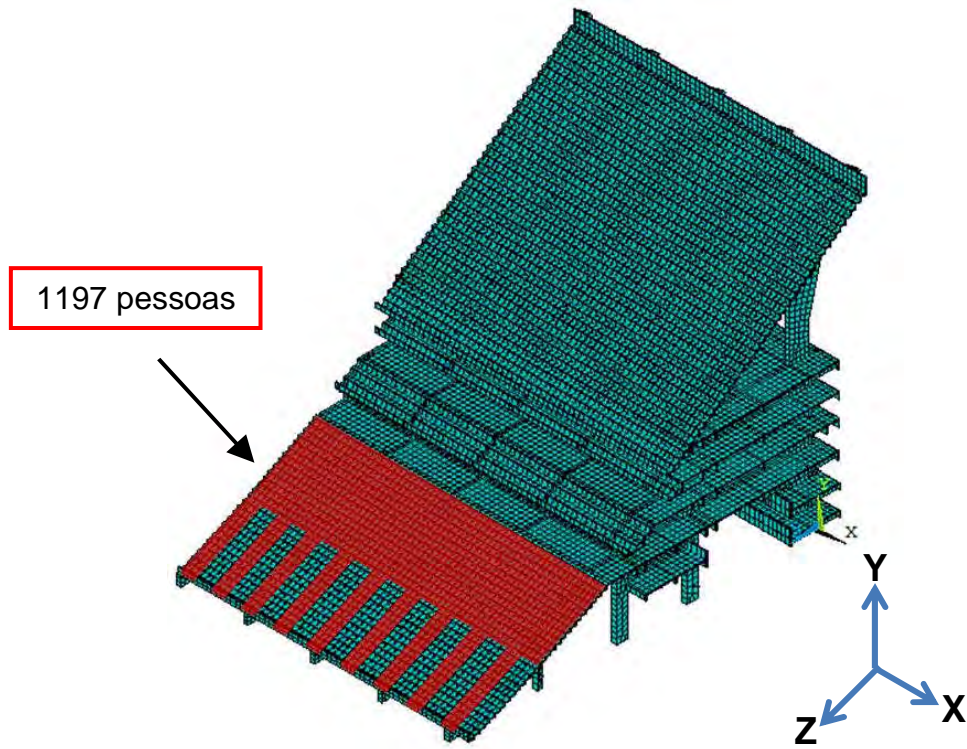


Figura 138 - Situação de carregamento SC-14

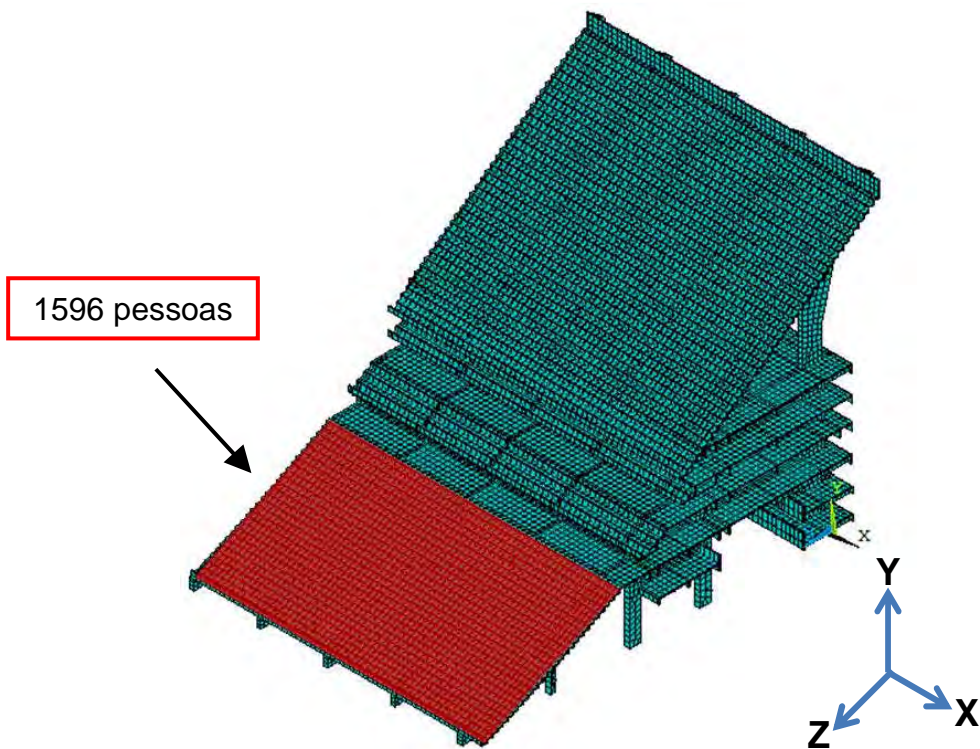


Figura 139 - Situação de carregamento SC-15

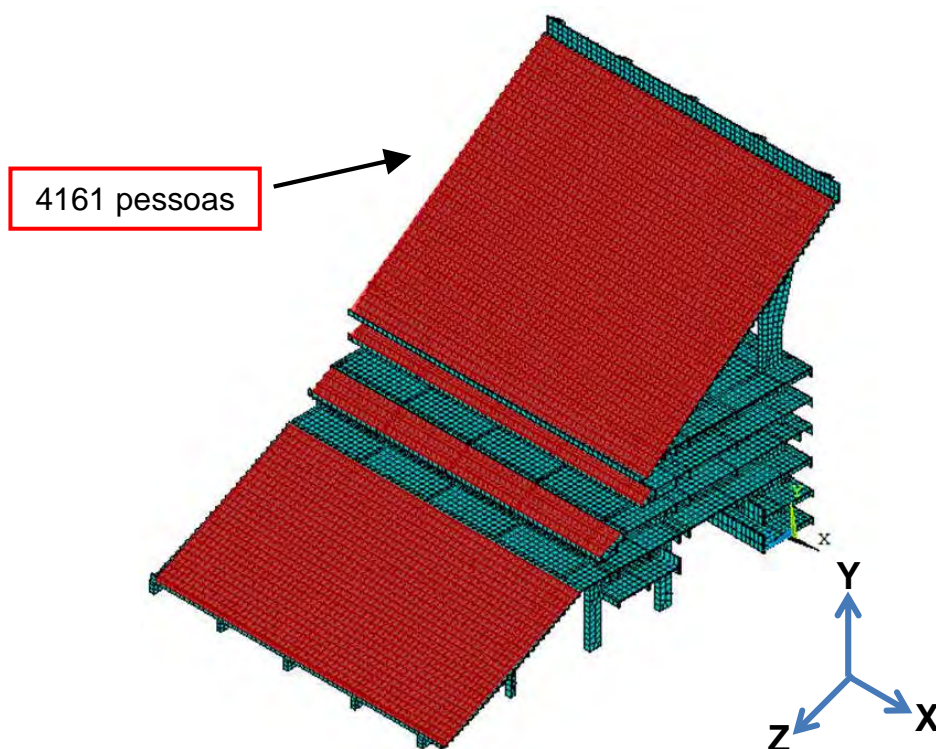


Figura 140 - Situação de carregamento SC-16

## 7.2 Posicionamento dos pontos de leitura para obtenção das respostas dinâmicas

A avaliação da resposta dinâmica do sistema estrutural foi realizada a partir dos resultados obtidos em doze diferentes pontos de leitura. A escolha desses pontos teve como base a análise dos modos de vibração apresentados na seção 6.1 (Figuras 112 a 121) de maneira que representassem o comportamento dos três diferentes setores da arquibancada (arquibancada superior, camarote e arquibancada inferior). A Tabela 29 apresenta a descrição detalhada da localização de cada um dos doze pontos de leitura e a Figura 141 ilustra o posicionamento destes pontos sobre a arquibancada.

Tabela 29 - Posicionamento dos pontos de leitura

Ponto de leitura	Localização	Descrição detalhada
1	Arquibancada superior	Centro do 2º vão entre a 2ª e 3ª vigas, no 3º degrau
2	Arquibancada superior	Centro do 3º vão entre a 3ª e 4ª vigas, no 6º degrau
3	Arquibancada superior	Centro do 1º vão entre a 1ª e 2ª vigas, no 20º degrau
4	Arquibancada superior	Centro do 4º vão entre a 4ª e 5ª vigas, no 9º degrau
5	Arquibancada superior	Centro do 2º vão entre a 2ª e 3ª vigas, no 30º degrau
6	Arquibancada superior	Centro do 3º vão entre a 3ª e 4ª vigas, no 25º degrau
7	Camarote	Centro do 2º vão entre a 2ª e 3ª vigas, no 3º degrau
8	Camarote	Centro do 1º degrau, na direção da 3ª viga
9	Camarote	Centro do 4º vão entre a 4ª e 5ª vigas, no 6º degrau
10	Arquibancada inferior	Centro do 3º vão entre a 3ª e 4ª vigas, no 3º degrau
11	Arquibancada inferior	Centro do 2º vão entre a 2ª e 3ª vigas, no 14º degrau
12	Arquibancada inferior	Centro do 4º vão entre a 4ª e 5ª vigas, no 20º degrau

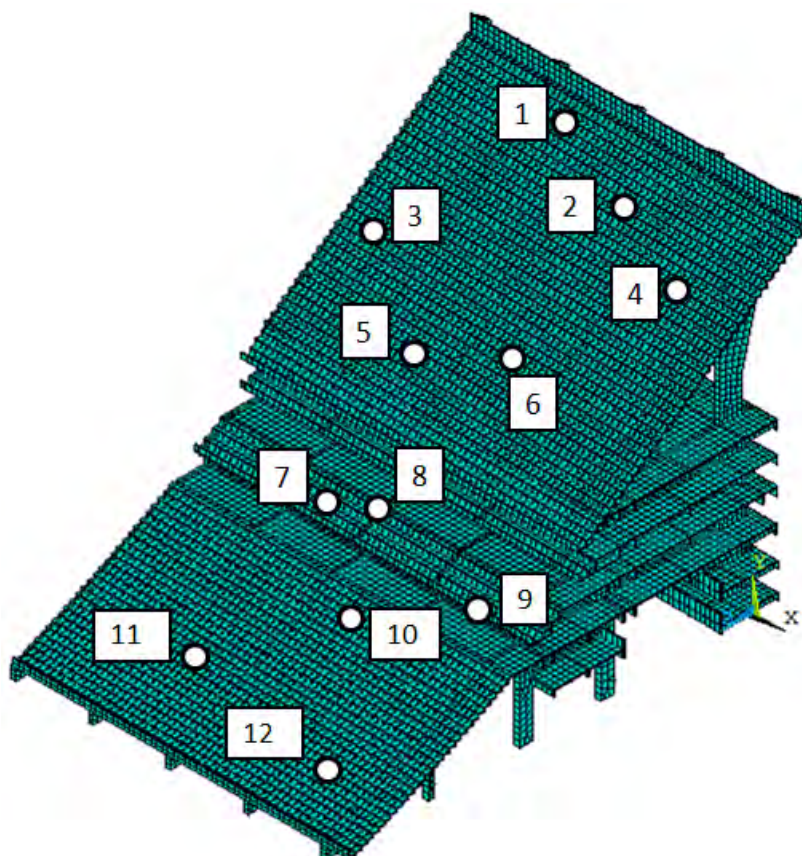


Figura 141 - Posicionamento dos pontos de leitura

### 7.3 Estudo do comportamento estrutural dinâmico global: modelos biodinâmicos

#### 7.3.1 Domínio do tempo

As respostas dinâmicas da arquibancada investigada, em termos de deslocamentos e acelerações no eixo vertical Y foram determinadas nos doze pontos de leitura para as dezesseis diferentes situações de carregamento (SC-1 a SC-16: Tabela 28).

Nas Figuras 142 a 155, os gráficos dos deslocamentos e das acelerações, no domínio do tempo, das situações de carregamento mais críticas, que são as situações com 75% e 100% de taxa de ocupação sobre a arquibancada (SC-4, SC-5, SC-9, SC-10, SC-14, SC-15 e SC-16), no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica, objetivaram representar o comportamento global do sistema estrutural investigado. As Figuras 142 a 148 apresentam os gráficos do deslocamento no domínio do tempo, enquanto as Figuras 149 a 155 ilustram os gráficos da aceleração no domínio do tempo.

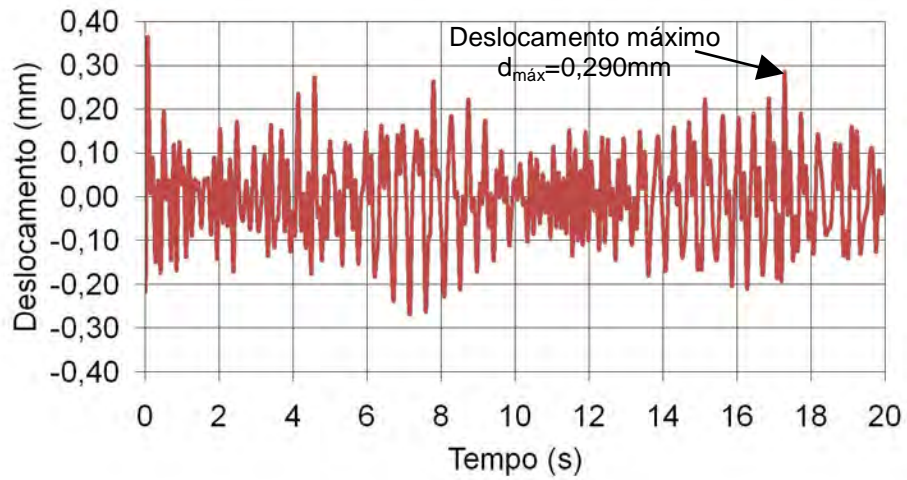


Figura 142 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-4 (ponto de análise 4)

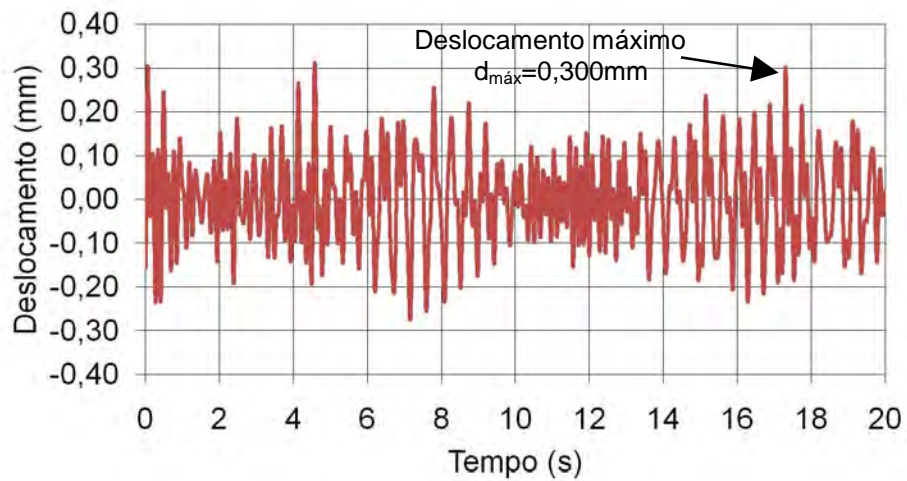


Figura 143 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-5 (ponto de análise 4)

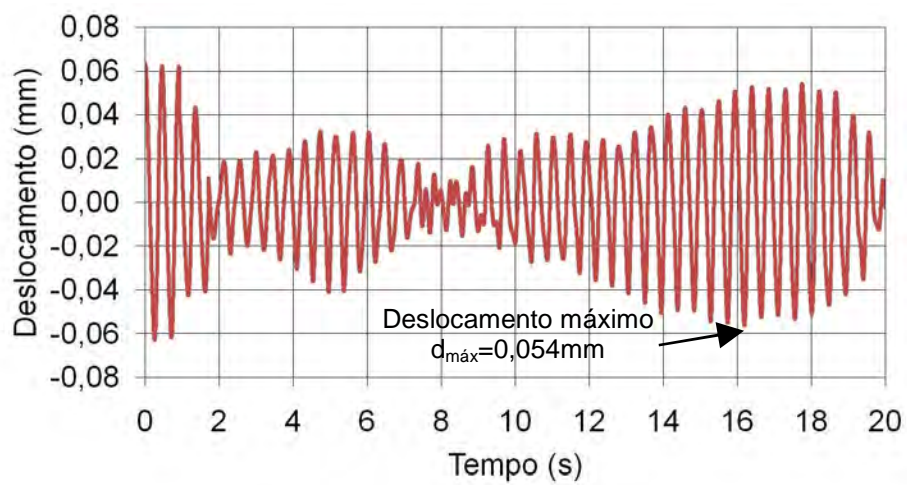


Figura 144 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-9 (ponto de análise 8)

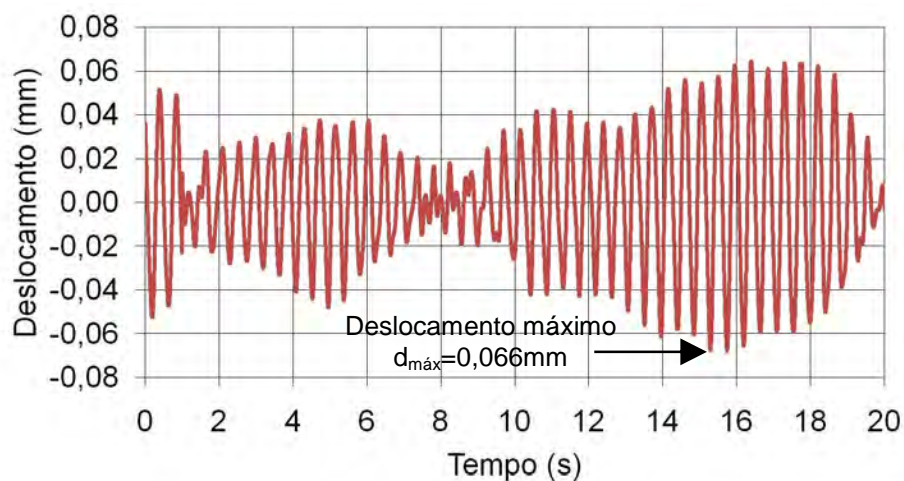


Figura 145 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-10 (ponto de análise 8)

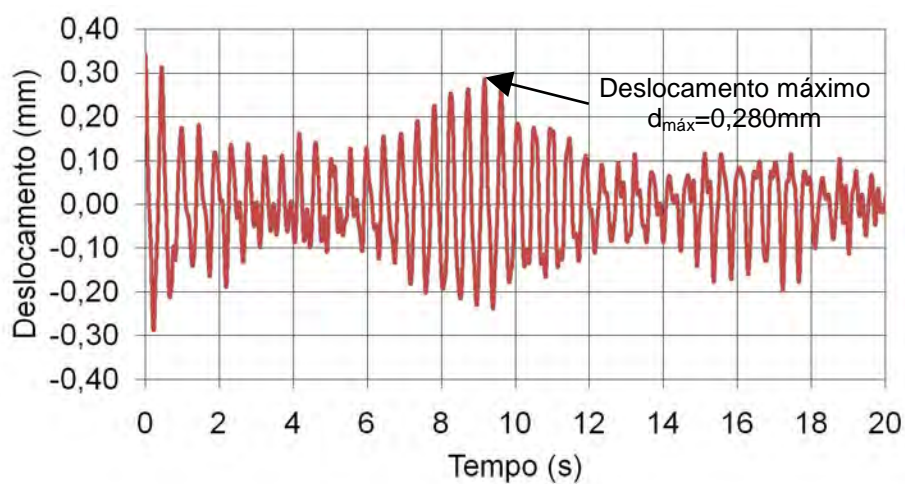


Figura 146 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-14 (ponto de análise 11)

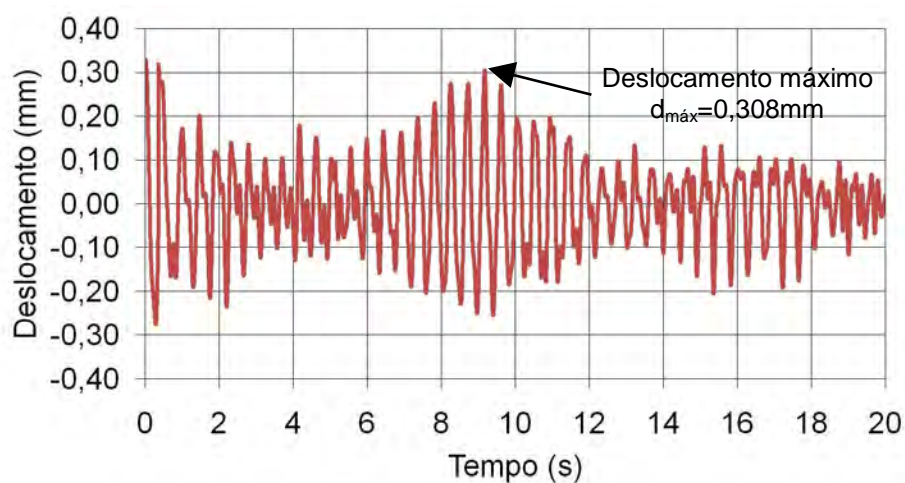


Figura 147 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-15 (ponto de análise 11)



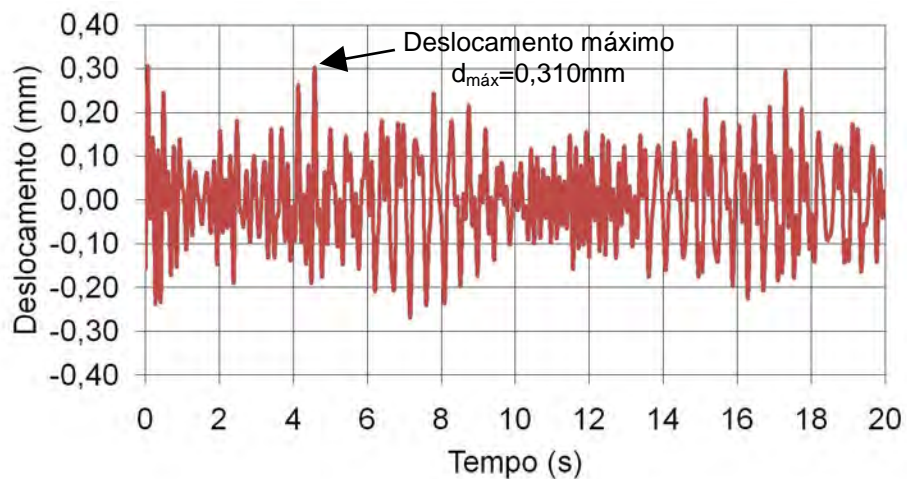


Figura 148 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-16 (ponto de análise 4)

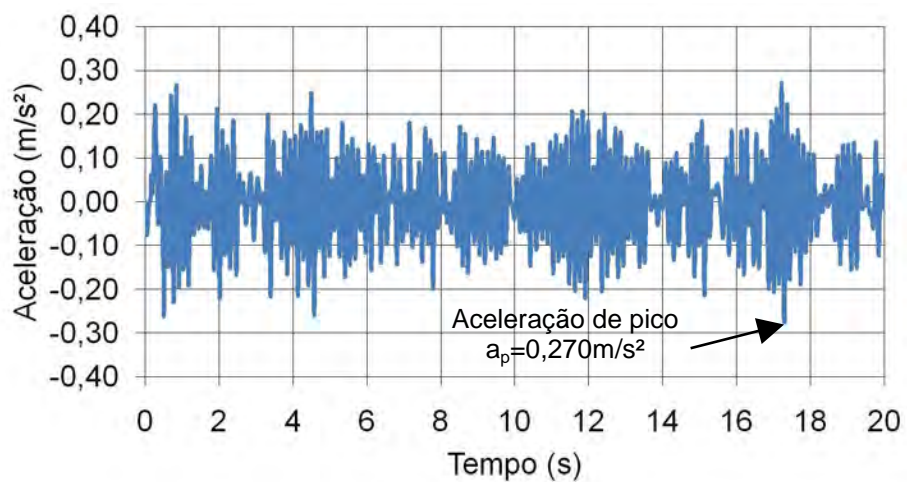


Figura 149 - Aceleração no domínio do tempo: SC-4 (ponto de análise 4)

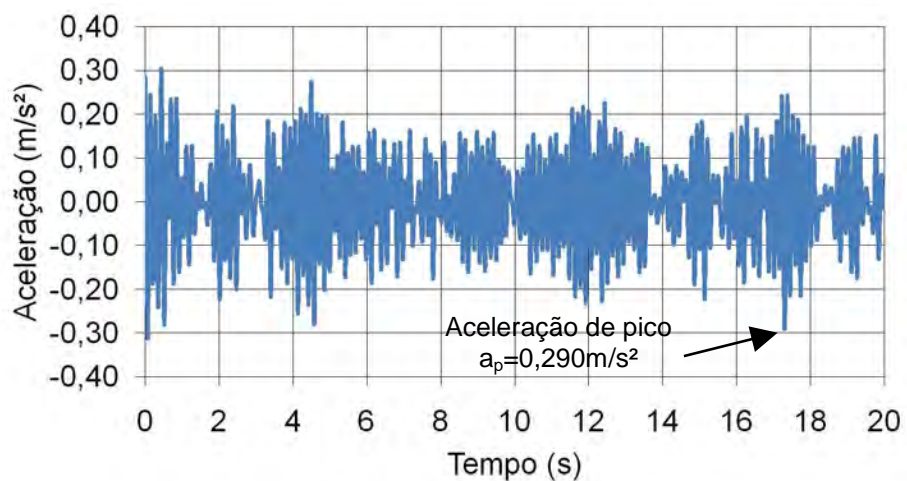


Figura 150 - Aceleração no domínio do tempo: SC-5 (ponto de análise 4)

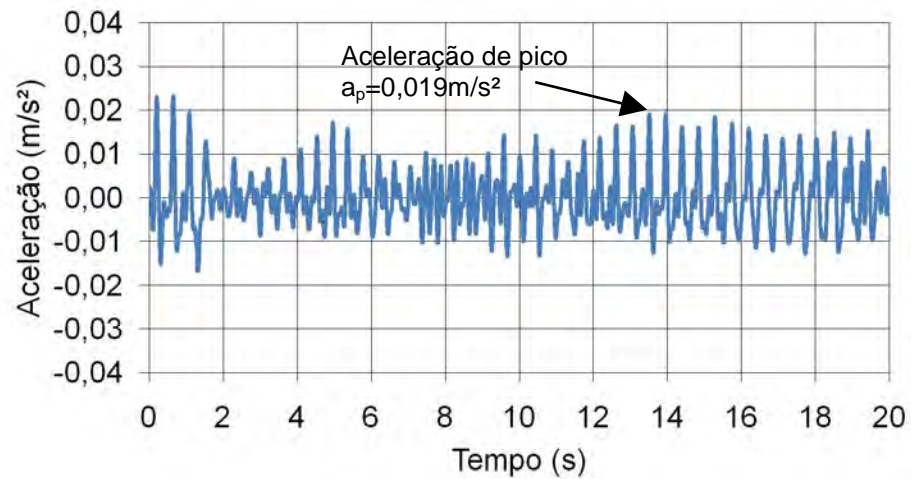


Figura 151 - Aceleração no domínio do tempo: SC-9 (ponto de análise 8)

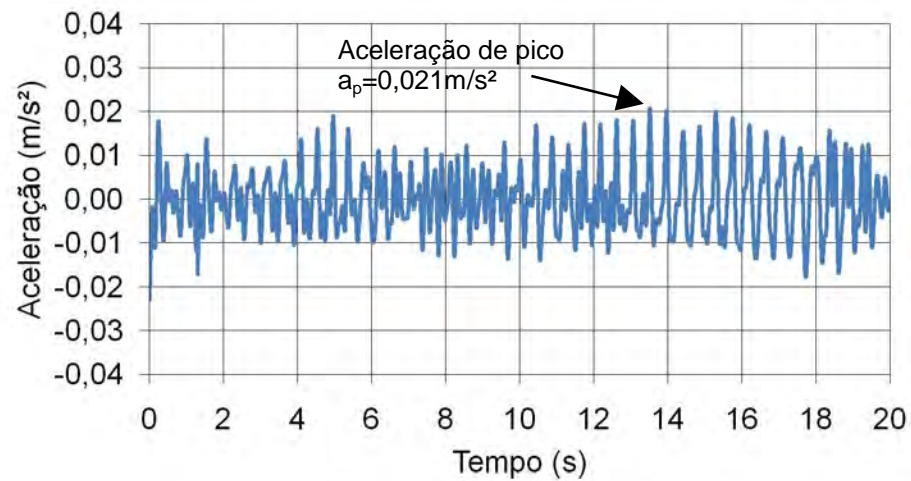


Figura 152 - Aceleração no domínio do tempo: SC-10 (ponto de análise 8)

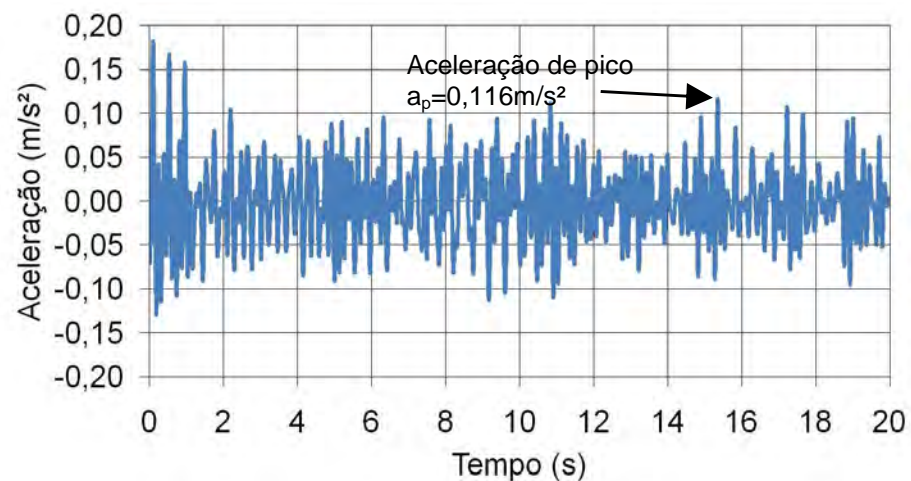


Figura 153 - Aceleração no domínio do tempo: SC-14 (ponto de análise 11)

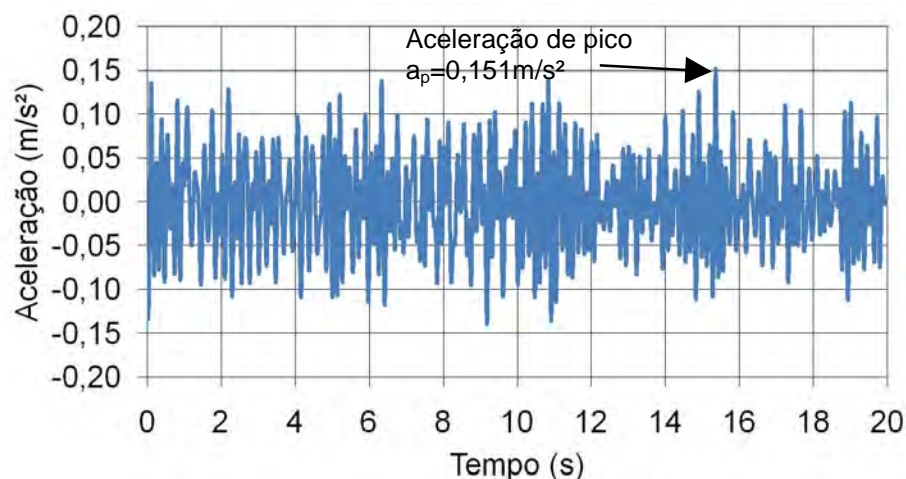


Figura 154 - Aceleração no domínio do tempo: SC-15 (ponto de análise 11)

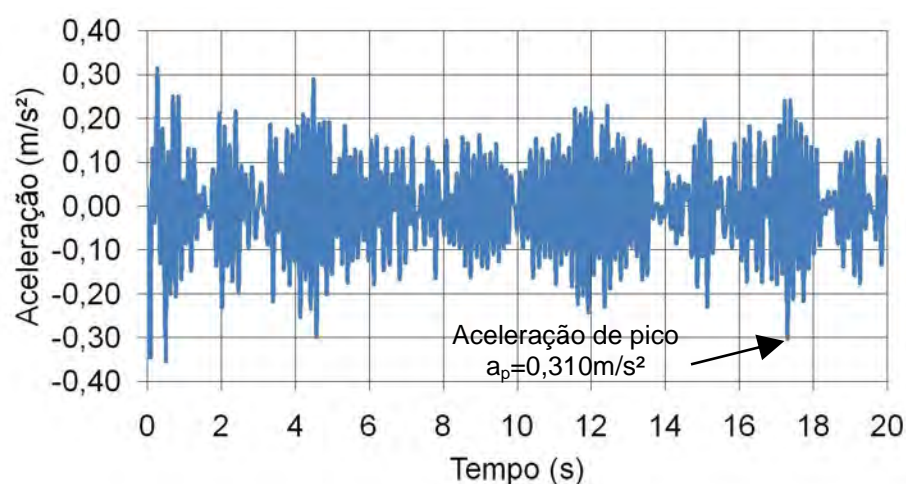


Figura 155 - Aceleração no domínio do tempo: SC-16 (ponto de análise 4)

Os valores dos deslocamentos e das acelerações aumentam à medida que ocorre um aumento da taxa de ocupação da arquibancada. Isso pode ser observado através dos resultados obtidos nos gráficos das Figuras 142 a 155, correspondentes à resposta dinâmica no eixo Y (eixo vertical).

Os valores máximos obtidos, tanto de deslocamento quanto de aceleração, foram determinados nas situações de carregamento SC-5 (100% de ocupação sobre a arquibancada superior; ver Figura 129), SC-10 (100% de ocupação sobre o camarote; ver Figura 134), SC-15 (100% de ocupação sobre a arquibancada inferior; ver Figura 139) e SC-16 (100% de ocupação em todos os três setores; ver Figura 140).

Ressalta-se ainda que todos os valores de deslocamento determinados nas dezesseis situações de carregamento estudadas (SC-1 a SC-16) atendem ao valor

estabelecido pela NBR 8800 (2008), que é igual a 5mm para estruturas sujeitas a prática de atividades humanas rítmicas de forma repetitiva. Nesse contexto, o deslocamento máximo foi encontrado na situação de carregamento SC-16 (100% de ocupação em todos os setores da arquibancada; ver Figura 140) e foi da ordem de 0,31mm ( $d_{\text{máx}}=0,31\text{mm}$ ).

### 7.3.2 Domínio da frequência

Os espectros referentes às respostas dinâmicas no domínio da frequência foram obtidos a partir da utilização da transformada rápida de Fourier (FFT), através do emprego do programa MATLAB (2017). As Figuras 156 a 162 apresentam os gráficos do deslocamento no domínio da frequência, enquanto as Figuras 163 a 169 apresentam os gráficos da aceleração no domínio da frequência, para as situações com 75% e 100% de taxa de ocupação da arquibancada (SC-4, SC-5, SC-9, SC-10, SC-14, SC-15 e SC-16), no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica, com o objetivo de representar o comportamento global da arquibancada estudada.

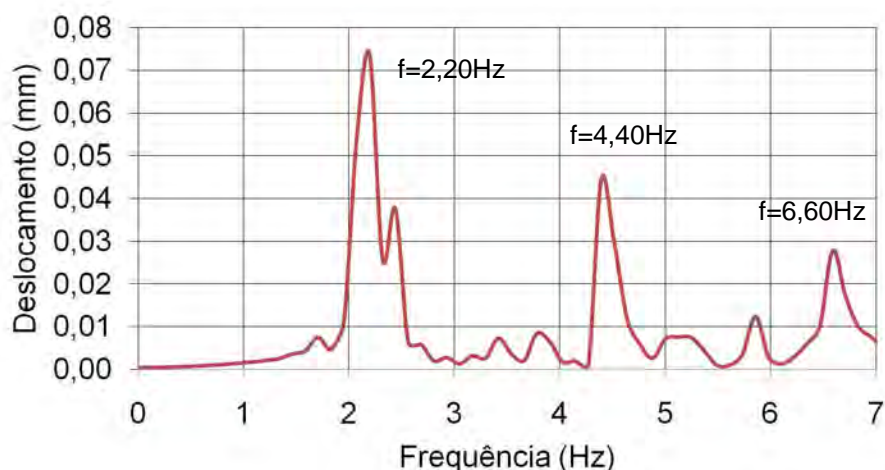


Figura 156 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-4 (ponto de análise 4)

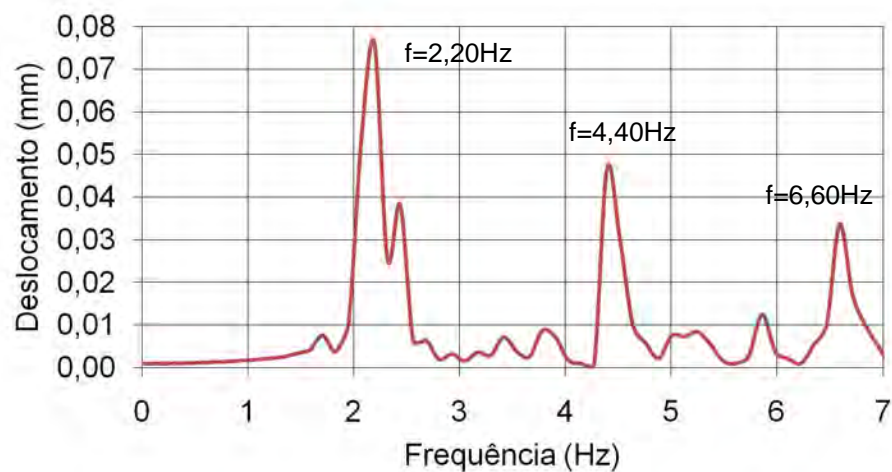


Figura 157 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-5 (ponto de análise 4)

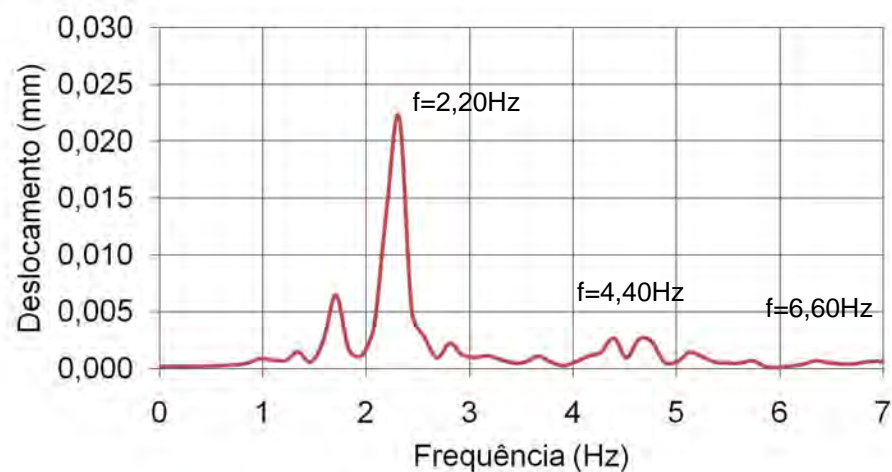


Figura 158 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-9 (ponto de análise 8)

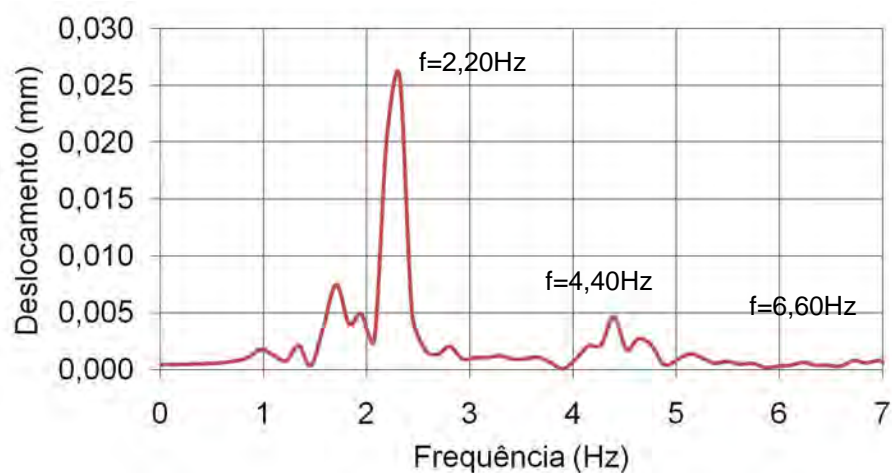


Figura 159 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-10 (ponto de análise 8)

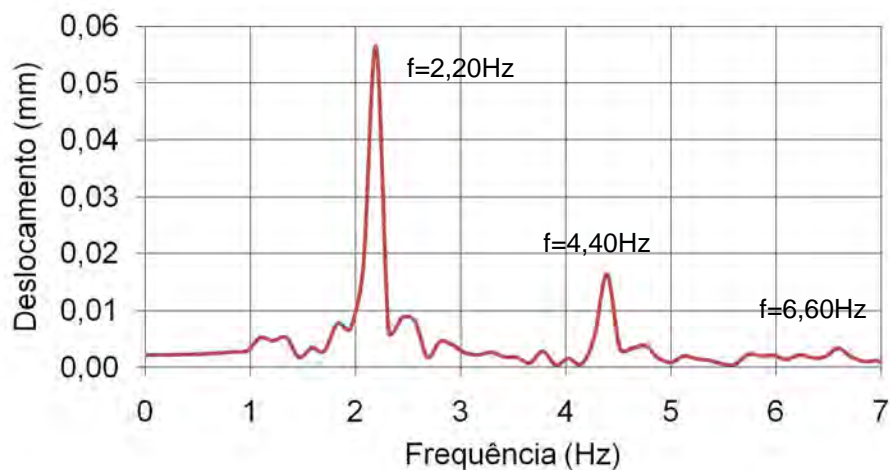


Figura 160 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-14 (ponto de análise 11)

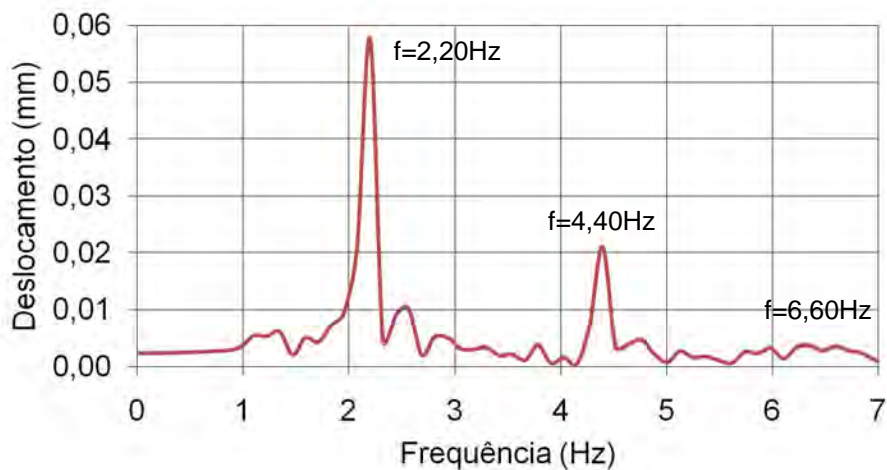


Figura 161 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-15 (ponto de análise 11)

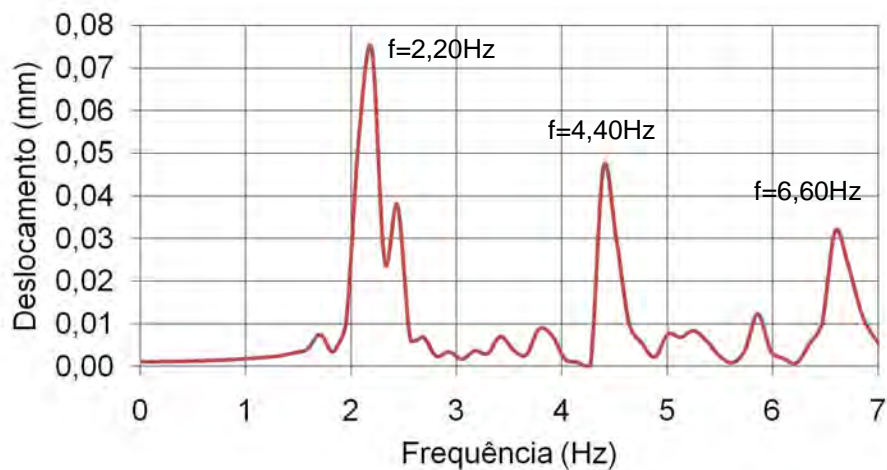


Figura 162 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-16 (ponto de análise 4)

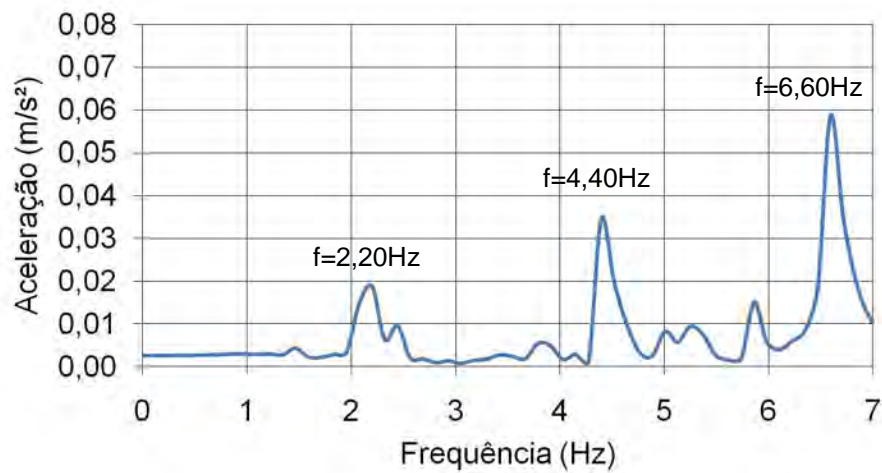


Figura 163 - Aceleração no domínio da frequência: SC-4 (ponto de análise 4)

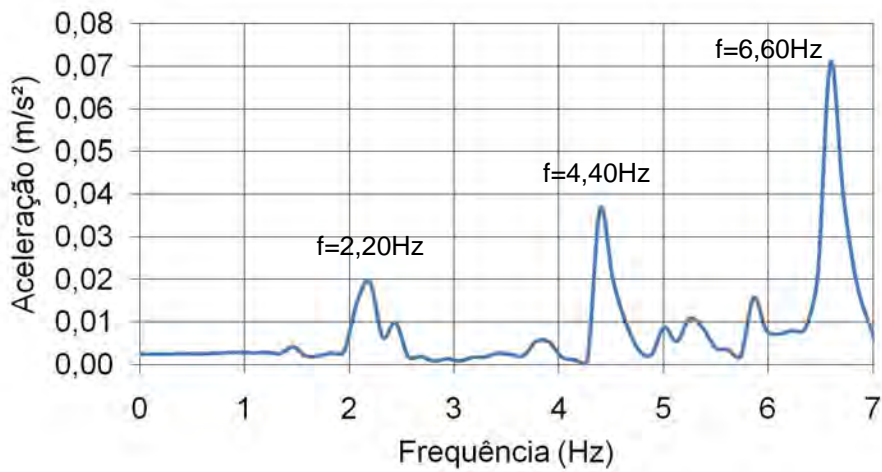


Figura 164 - Aceleração no domínio da frequência: SC-5 (ponto de análise 4)

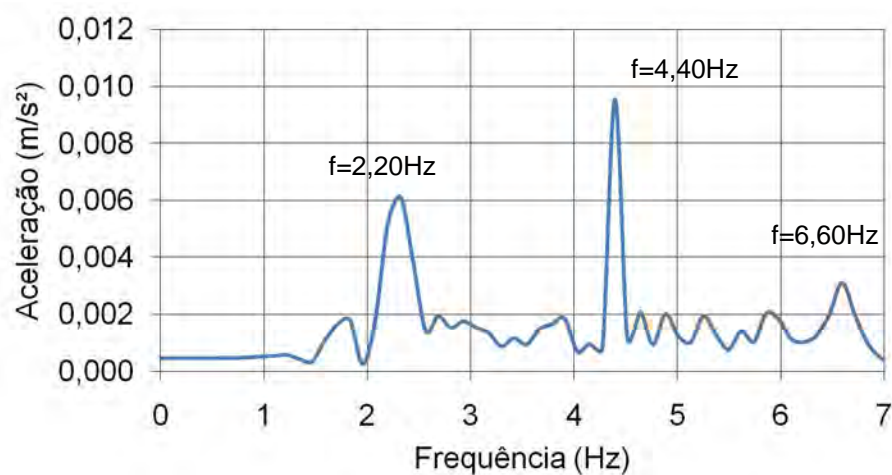


Figura 165 - Aceleração no domínio da frequência: SC-9 (ponto de análise 8)

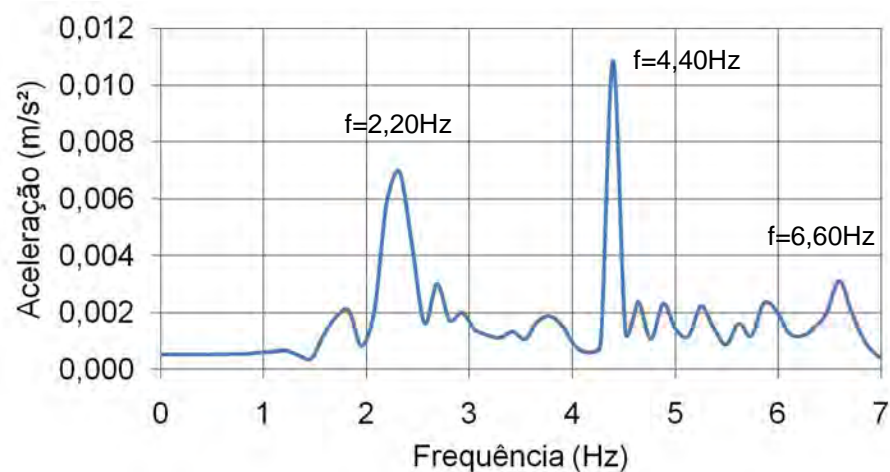


Figura 166 - Aceleração no domínio da frequência: SC-10 (ponto de análise 8)

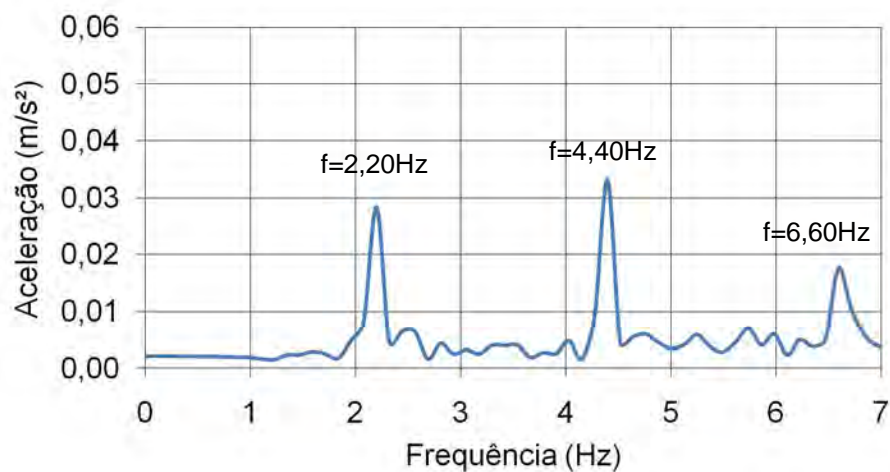


Figura 167 - Aceleração no domínio da frequência: SC-14 (ponto de análise 11)

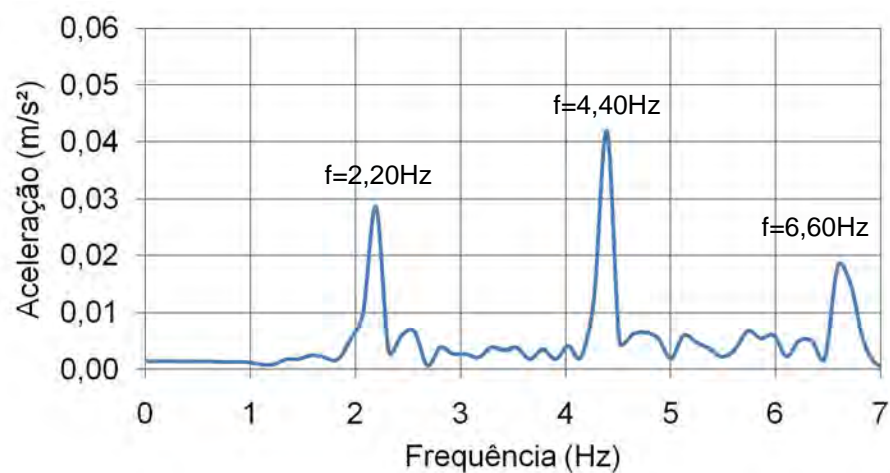


Figura 168 - Aceleração no domínio da frequência: SC-15 (ponto de análise 11)



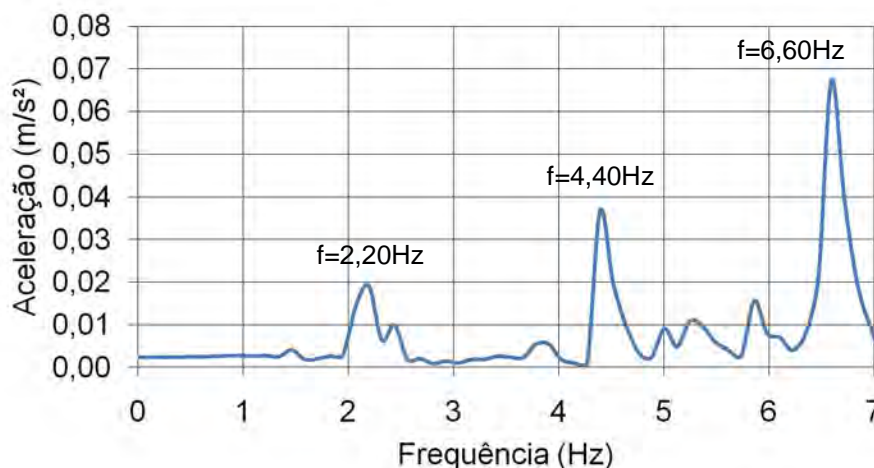


Figura 169 - Aceleração no domínio da frequência: SC-16 (ponto de análise 4)

Os picos onde ocorrem as maiores transferências de energia do sistema correspondem, principalmente aos três harmônicos da excitação dinâmica humana ( $f_{01}=2,20\text{Hz}$ ;  $f_{02}=4,40\text{Hz}$  e  $f_{03}=6,60\text{Hz}$ ). Esses resultados foram apresentados nas Figuras 156 a 169 e correspondem à resposta dinâmica no eixo Y (eixo vertical). Cabe ressaltar que a ação dinâmica humana (torcida) também ativou outros modos de vibração do sistema estrutural que não representam os harmônicos da excitação, como por exemplo, as frequências de 2,47Hz e 5,75Hz, que correspondem ao terceiro e ao nono modos de vibração da estrutura, respectivamente. Tal verificação corrobora com diversos estudos realizados, como o trabalho de Ellis e Ji (1997).

### 7.3.3 Comparação entre as situações de carregamento SC-1 e SC-5

As Figuras 170 a 173 apresentam uma comparação das respostas dinâmicas em termos de deslocamento e aceleração, no domínio do tempo e da frequência, entre a situação de carregamento com menor taxa de ocupação sobre a arquibancada superior (situação SC-1: 12,5% de taxa de ocupação; ver Figura 125) e a situação de carregamento com a maior taxa de ocupação sobre a arquibancada superior (situação SC-5: 100% de taxa de ocupação; ver Figura 129), no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica (ponto de leitura 4).

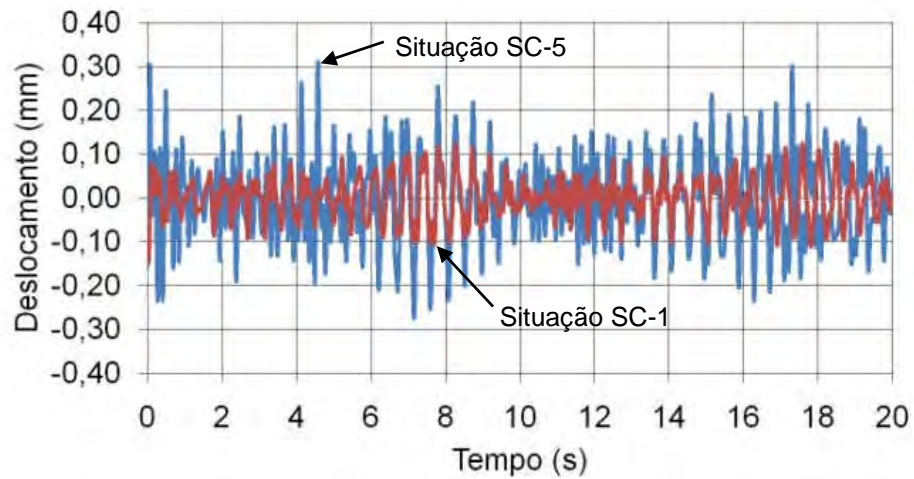


Figura 170 - Espectros de deslocamento, no domínio do tempo: SC-1 e SC-5 (ponto de leitura 4)

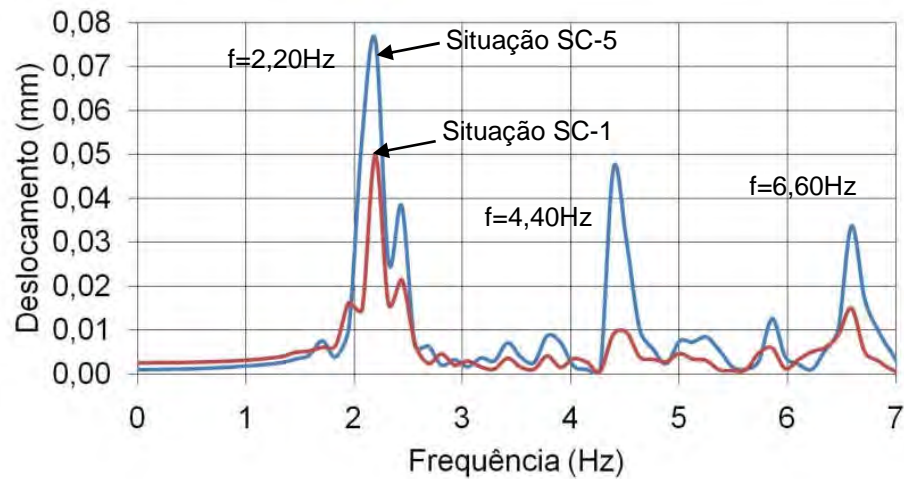


Figura 171 - Espectros de deslocamento, no domínio da frequência: SC-1 e SC-5 (ponto de leitura 4)

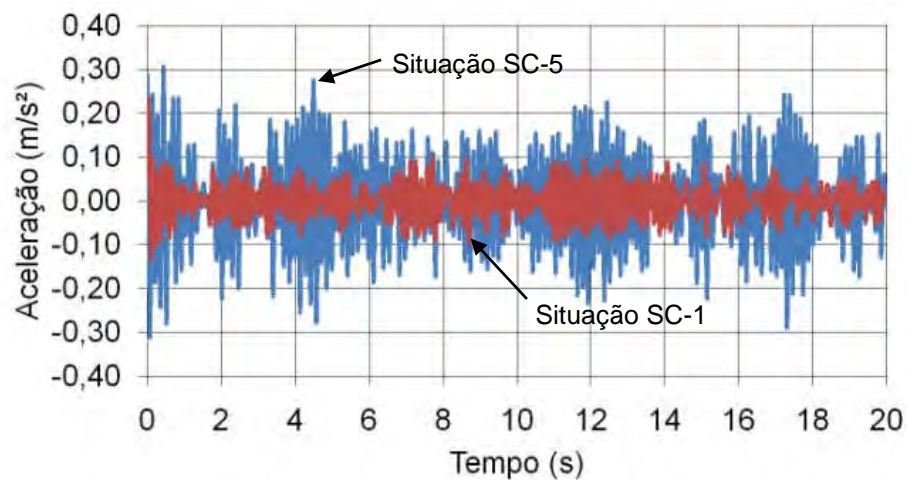


Figura 172 - Espectros de aceleração, no domínio do tempo: SC-1 e SC-5 (ponto de leitura 4)

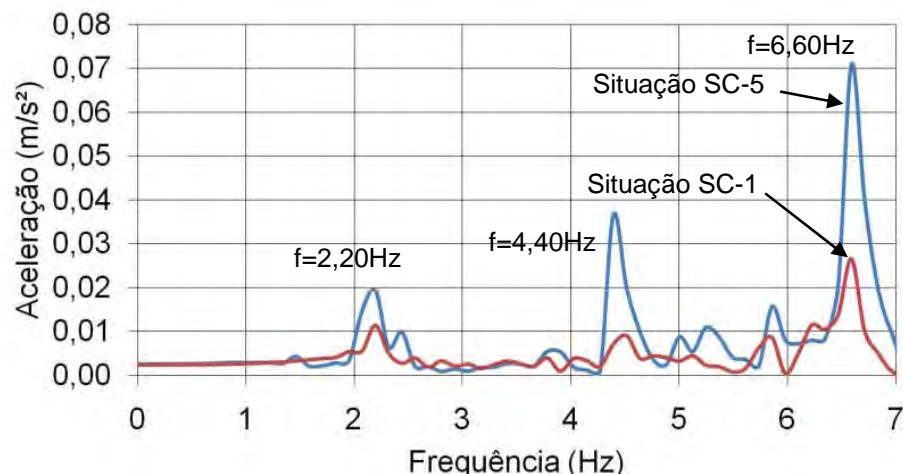


Figura 173 - Espectros de aceleração, no domínio da frequência: SC-1 e SC-5 (ponto de leitura 4)

A influência da ocupação das pessoas sobre o sistema estrutural é evidente nas Figuras 170 e 173, uma vez que os valores de deslocamento e aceleração são significativamente maiores na situação SC-5 ao se comparar com a situação SC-1. Portanto, nota-se, novamente, que quanto maior a taxa de ocupação presente sobre o sistema estrutural, maior é a amplitude da resposta estrutural.

#### 7.4 Análise quantitativa das situações de carregamento: modelos biodinâmicos

As Tabelas 30 a 45 apresentam os valores das acelerações máximas, em termos de aceleração de pico, de aceleração em *rms* e de aceleração em valores de doses de vibração (VDV), nos doze pontos de leitura. Esses valores resultam da análise quantitativa das dezesseis diferentes situações de carregamento (SC-1 a SC-16), que consideram taxas de ocupação que variam de 12,5% a 100% em todos os setores da arquibancada investigada.

Tabela 30 - Acelerações verticais máximas: SC-1 (Figura 125)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p(\text{pico})$	$a_{w,rms} (rms)$	
1	0,030	0,017	0,084
2	0,027	0,014	0,063
3	0,027	0,020	0,048
<b>4</b>	<b>0,094</b>	<b>0,074</b>	<b>0,175</b>
5	0,007	0,006	0,023
6	0,025	0,015	0,041
7	0,004	0,002	0,006
8	0,021	0,012	0,026
9	0,003	0,002	0,017
10	0,017	0,007	0,019
11	0,004	0,002	0,005
12	0,001	0,001	0,002

Ilustração da situação estudada

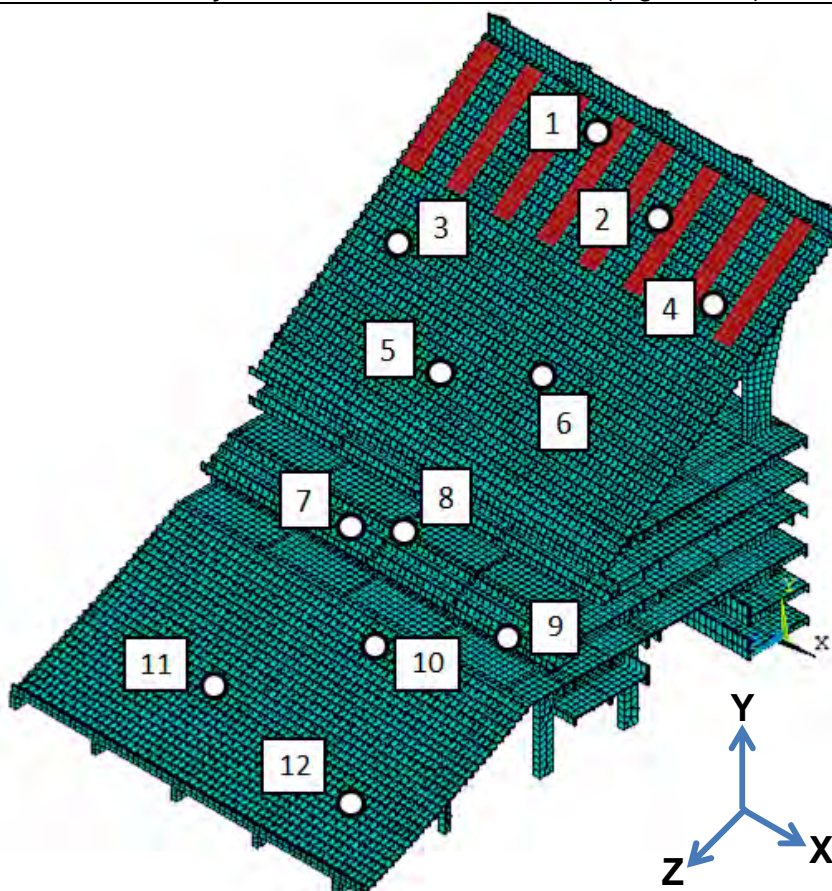


Tabela 31 - Acelerações verticais máximas: SC-2 (Figura 126)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,036	0,025	0,117
2	0,032	0,027	0,062
3	0,058	0,052	0,137
<b>4</b>	<b>0,124</b>	<b>0,105</b>	<b>0,240</b>
5	0,012	0,010	0,090
6	0,070	0,057	0,337
7	0,004	0,003	0,027
8	0,029	0,027	0,076
9	0,003	0,003	0,014
10	0,013	0,006	0,023
11	0,003	0,002	0,009
12	0,001	0,001	0,002

Ilustração da situação estudada

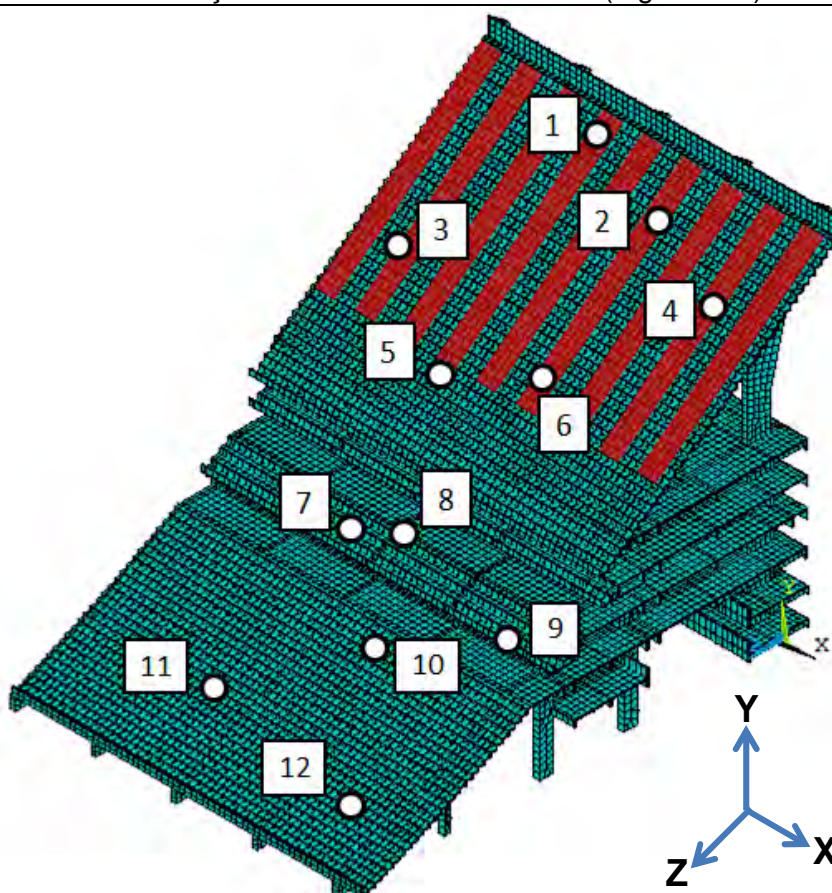


Tabela 32 - Acelerações verticais máximas: SC-3 (Figura 127)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,045	0,036	0,083
2	0,048	0,031	0,074
3	0,068	0,040	0,108
<b>4</b>	<b>0,216</b>	<b>0,122</b>	<b>0,293</b>
5	0,023	0,017	0,058
6	0,110	0,049	0,139
7	0,003	0,002	0,025
8	0,023	0,020	0,079
9	0,002	0,002	0,015
10	0,010	0,006	0,013
11	0,003	0,002	0,010
12	0,001	0,001	0,003

Ilustração da situação estudada

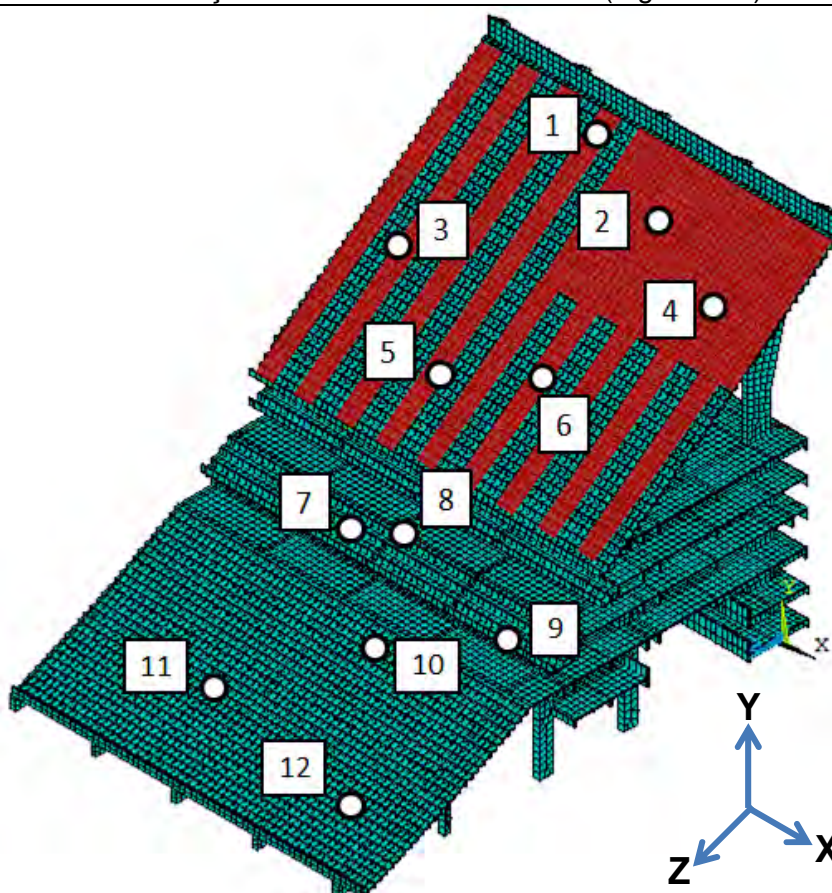


Tabela 33 - Acelerações verticais máximas: SC-4 (Figura 128)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,079	0,050	0,117
2	0,053	0,030	0,062
3	0,078	0,052	0,140
<b>4</b>	<b>0,270</b>	<b>0,146</b>	<b>0,305</b>
5	0,028	0,027	0,090
6	0,120	0,095	0,337
7	0,004	0,003	0,027
8	0,030	0,027	0,076
9	0,003	0,002	0,014
10	0,013	0,006	0,023
11	0,003	0,003	0,090
12	0,001	0,001	0,002

Ilustração da situação estudada

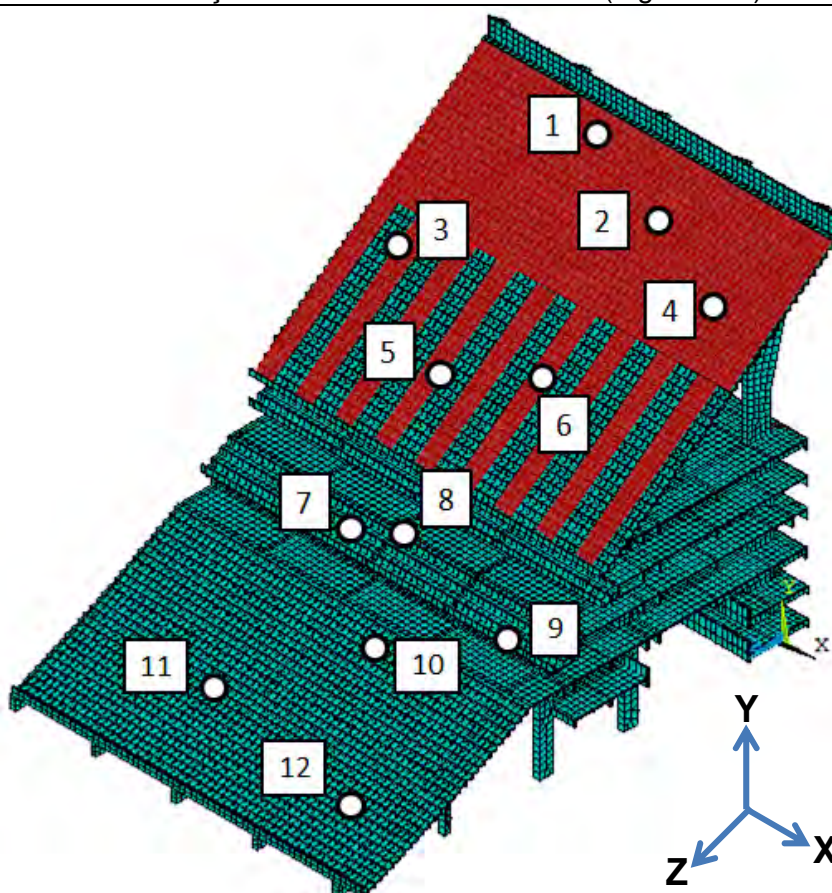


Tabela 34 - Acelerações verticais máximas: SC-5 (Figura 129)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,088	0,058	0,159
2	0,057	0,033	0,071
3	0,100	0,052	0,118
<b>4</b>	<b>0,290</b>	<b>0,158</b>	<b>0,376</b>
5	0,041	0,039	0,147
6	0,130	0,095	0,315
7	0,004	0,003	0,032
8	0,029	0,027	0,080
9	0,002	0,002	0,015
10	0,011	0,007	0,015
11	0,004	0,004	0,012
12	0,001	0,001	0,003

Ilustração da situação estudada

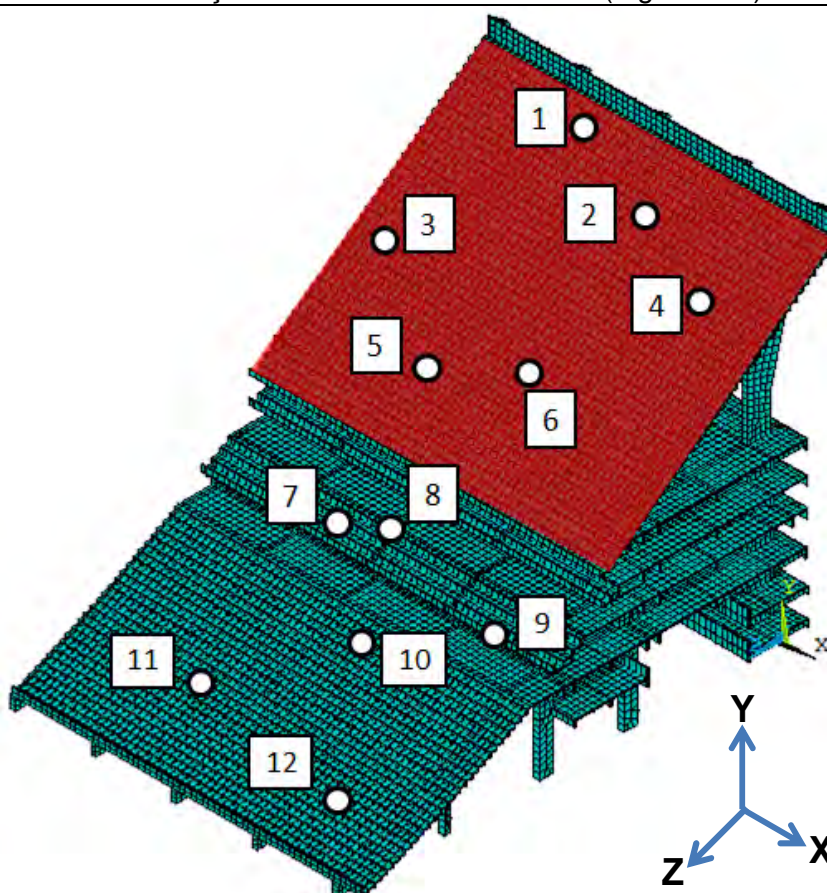




Tabela 35 - Acelerações verticais máximas: SC-6 (Figura 130)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,002	0,001	0,002
2	0,001	0,001	0,002
3	0,001	0,001	0,005
4	0,001	0,001	0,002
5	0,001	0,001	0,004
6	0,001	0,001	0,007
7	0,002	0,001	0,010
<b>8</b>	<b>0,005</b>	<b>0,004</b>	<b>0,018</b>
9	0,001	0,001	0,018
10	0,002	0,001	0,003
11	0,001	0,001	0,002
12	0,001	0,001	0,003

Ilustração da situação estudada

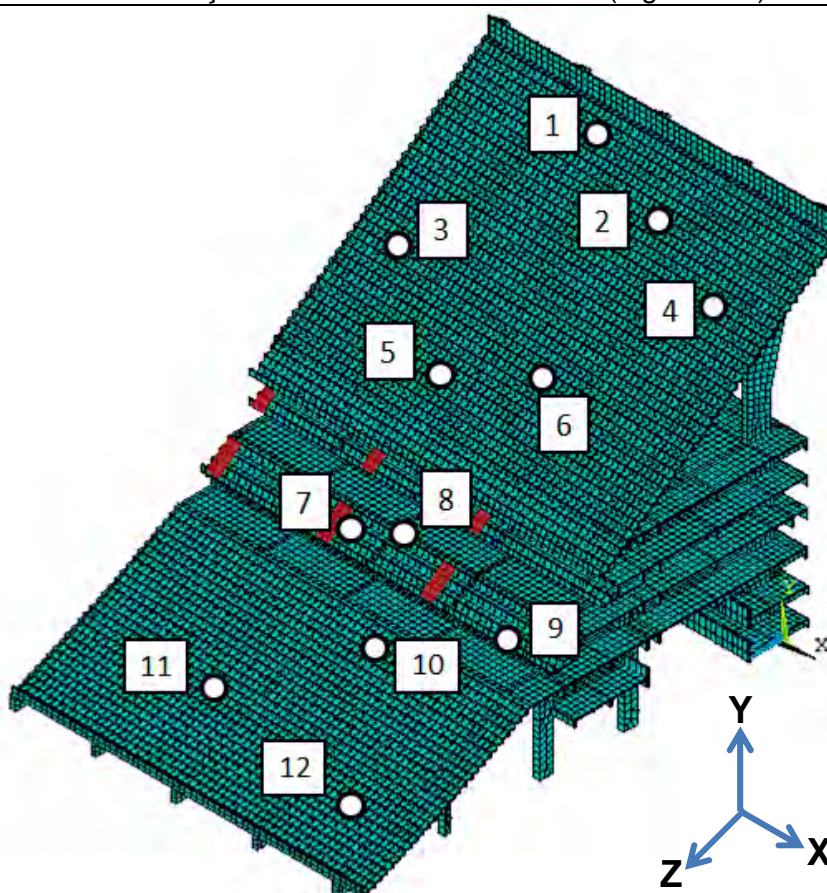


Tabela 36 - Acelerações verticais máximas: SC-7 (Figura 131)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,002	0,001	0,003
2	0,002	0,001	0,004
3	0,002	0,001	0,003
4	0,001	0,001	0,002
5	0,001	0,001	0,003
6	0,001	0,001	0,004
7	0,005	0,003	0,011
<b>8</b>	<b>0,007</b>	<b>0,005</b>	<b>0,020</b>
9	0,006	0,004	0,012
10	0,003	0,001	0,004
11	0,001	0,001	0,003
12	0,001	0,001	0,002

Ilustração da situação estudada

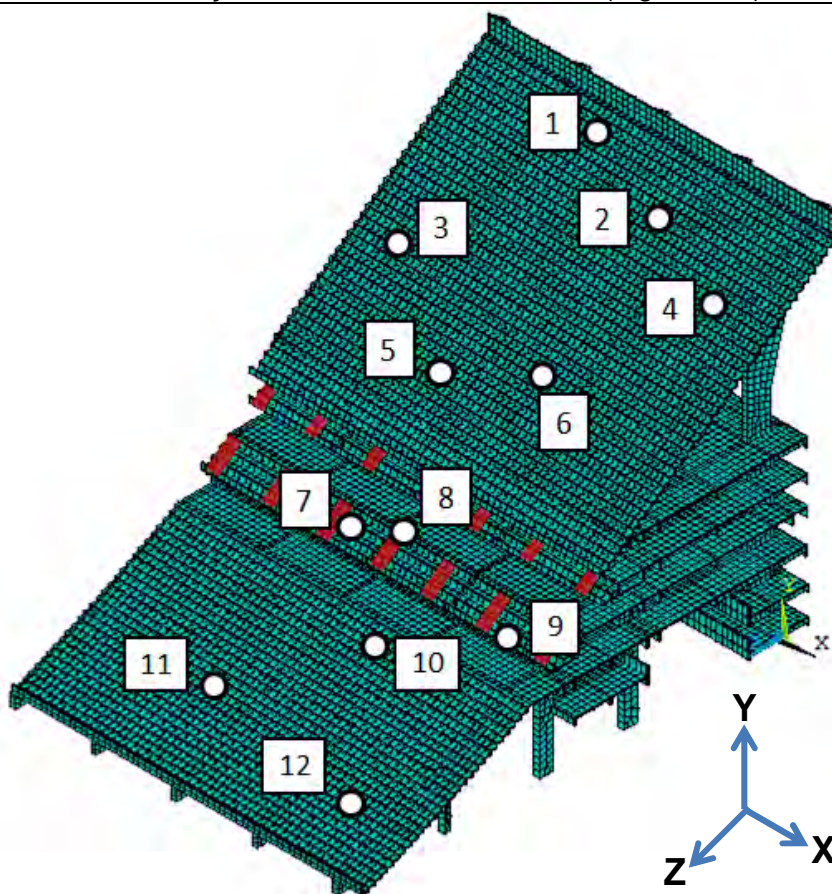


Tabela 37 - Acelerações verticais máximas: SC-8 (Figura 132)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,003	0,002	0,004
2	0,003	0,001	0,003
3	0,002	0,001	0,004
4	0,002	0,001	0,004
5	0,002	0,001	0,003
6	0,001	0,001	0,004
7	0,006	0,004	0,025
<b>8</b>	<b>0,012</b>	<b>0,010</b>	<b>0,043</b>
9	0,006	0,005	0,031
10	0,004	0,002	0,008
11	0,001	0,001	0,003
12	0,001	0,001	0,001

Ilustração da situação estudada

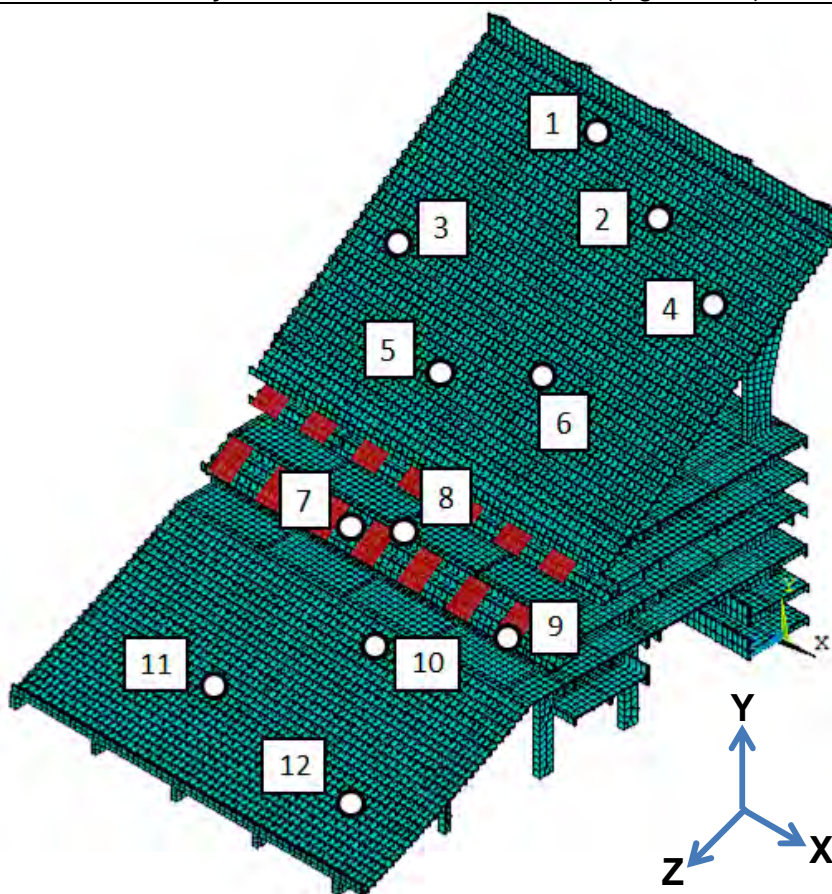


Tabela 38 - Acelerações verticais máximas: SC-9 (Figura 133)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,004	0,002	0,006
2	0,003	0,003	0,004
3	0,003	0,003	0,010
4	0,003	0,002	0,006
5	0,003	0,002	0,008
6	0,002	0,002	0,006
7	0,011	0,010	0,042
<b>8</b>	<b>0,019</b>	<b>0,015</b>	<b>0,082</b>
9	0,007	0,007	0,049
10	0,006	0,003	0,013
11	0,001	0,001	0,003
12	0,001	0,001	0,001

Ilustração da situação estudada

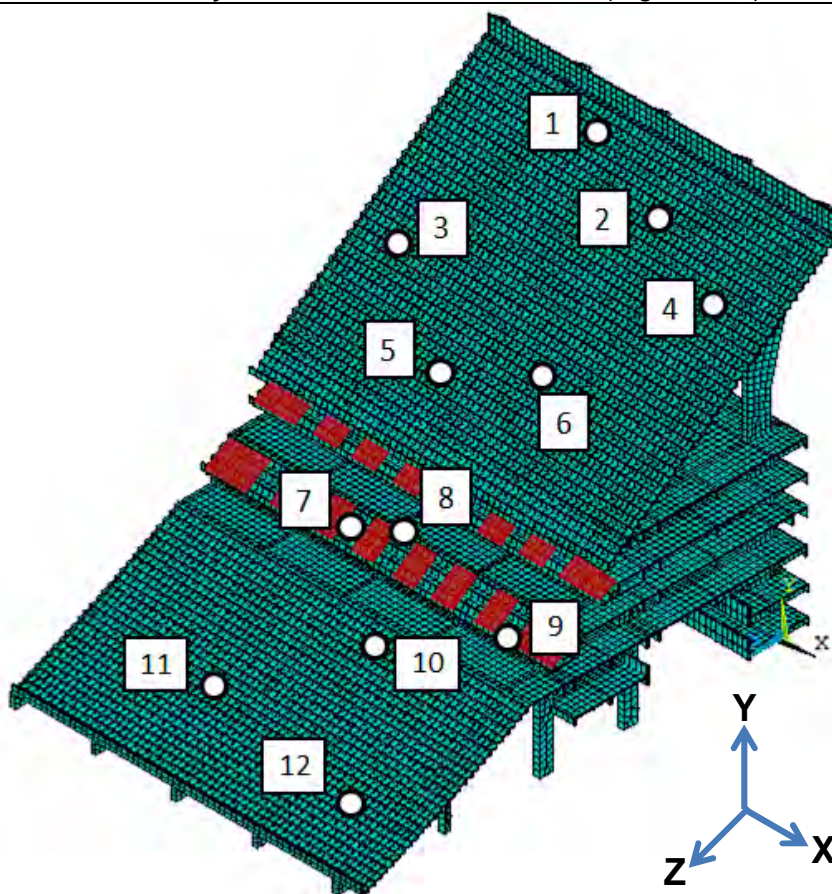


Tabela 39 - Acelerações verticais máximas: SC-10 (Figura 134)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,005	0,003	0,007
2	0,005	0,003	0,006
3	0,004	0,002	0,008
4	0,003	0,002	0,007
5	0,003	0,002	0,007
6	0,002	0,002	0,008
7	0,016	0,012	0,053
<b>8</b>	<b>0,021</b>	<b>0,015</b>	<b>0,105</b>
9	0,008	0,006	0,058
10	0,007	0,004	0,015
11	0,002	0,001	0,004
12	0,001	0,001	0,001

Ilustração da situação estudada

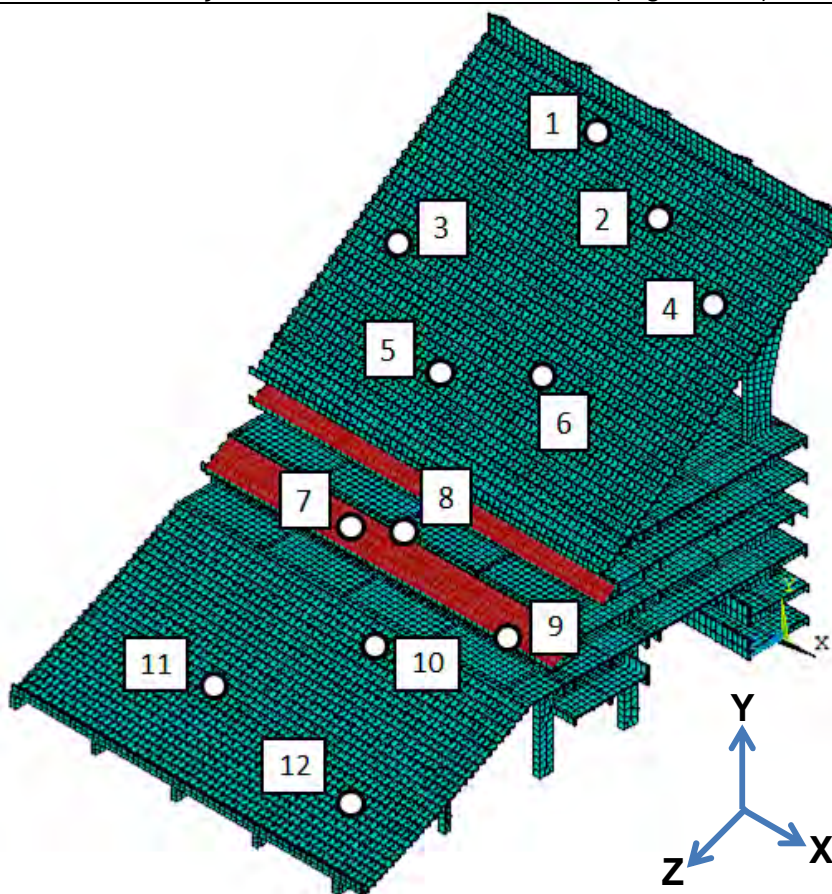


Tabela 40 - Acelerações verticais máximas: SC-11 (Figura 135)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,012	0,006	0,014
2	0,015	0,007	0,018
3	0,010	0,006	0,013
4	0,007	0,006	0,013
5	0,004	0,003	0,008
6	0,005	0,005	0,021
7	0,004	0,003	0,026
8	0,018	0,008	0,021
9	0,004	0,003	0,030
10	0,019	0,009	0,095
<b>11</b>	<b>0,029</b>	<b>0,023</b>	<b>0,202</b>
12	0,001	0,001	0,030

Ilustração da situação estudada

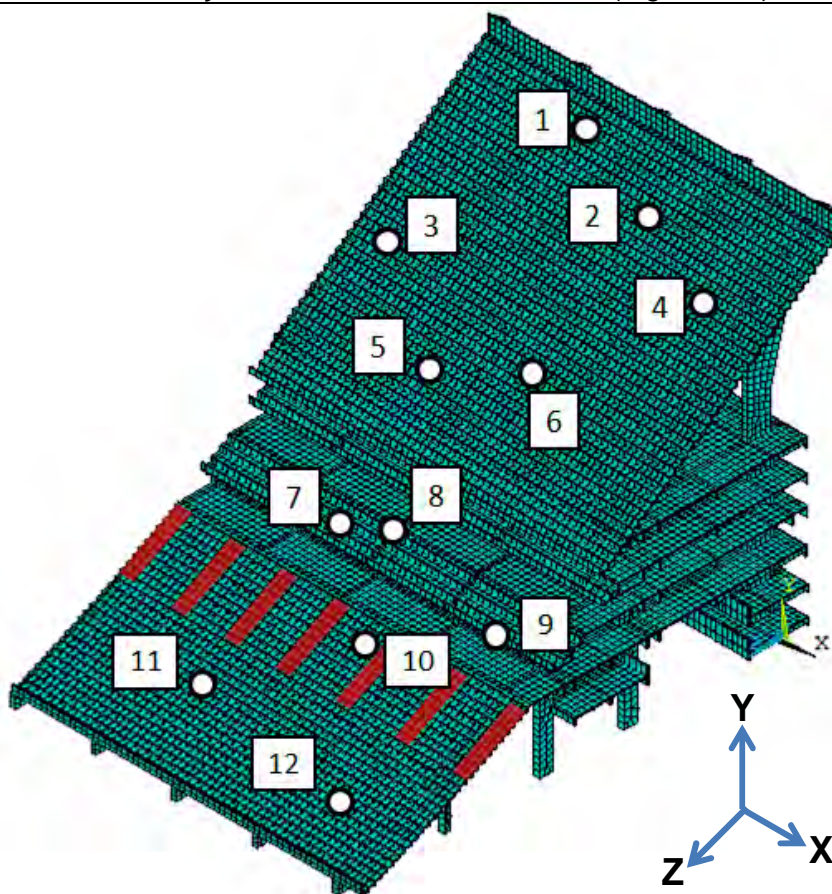


Tabela 41 - Acelerações verticais máximas: SC-12 (Figura 136)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,014	0,007	0,015
2	0,019	0,008	0,025
3	0,008	0,007	0,020
4	0,016	0,010	0,027
5	0,003	0,003	0,010
6	0,004	0,003	0,022
7	0,003	0,002	0,034
8	0,013	0,007	0,017
9	0,003	0,002	0,040
10	0,026	0,016	0,158
<b>11</b>	<b>0,065</b>	<b>0,043</b>	<b>0,226</b>
12	0,001	0,001	0,030

Ilustração da situação estudada

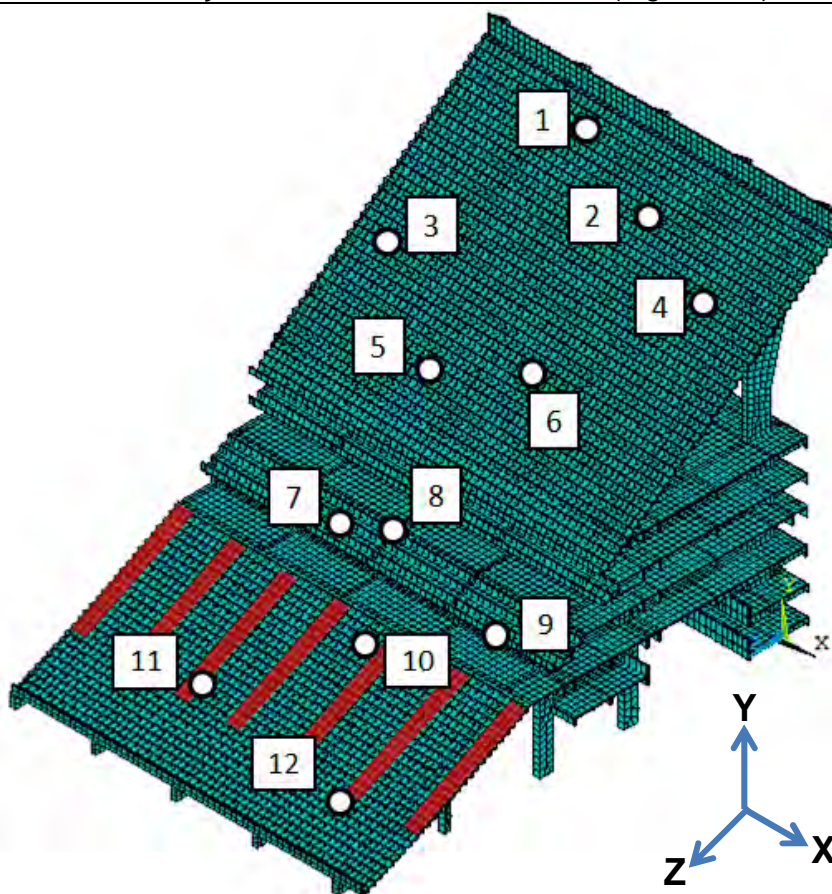


Tabela 42 - Acelerações verticais máximas: SC-13 (Figura 137)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,018	0,009	0,027
2	0,023	0,009	0,025
3	0,015	0,011	0,029
4	0,012	0,009	0,025
5	0,005	0,002	0,006
6	0,008	0,004	0,011
7	0,004	0,003	0,040
8	0,020	0,007	0,036
9	0,004	0,003	0,043
10	0,042	0,039	0,201
<b>11</b>	<b>0,075</b>	<b>0,055</b>	<b>0,231</b>
12	0,015	0,013	0,081

Ilustração da situação estudada

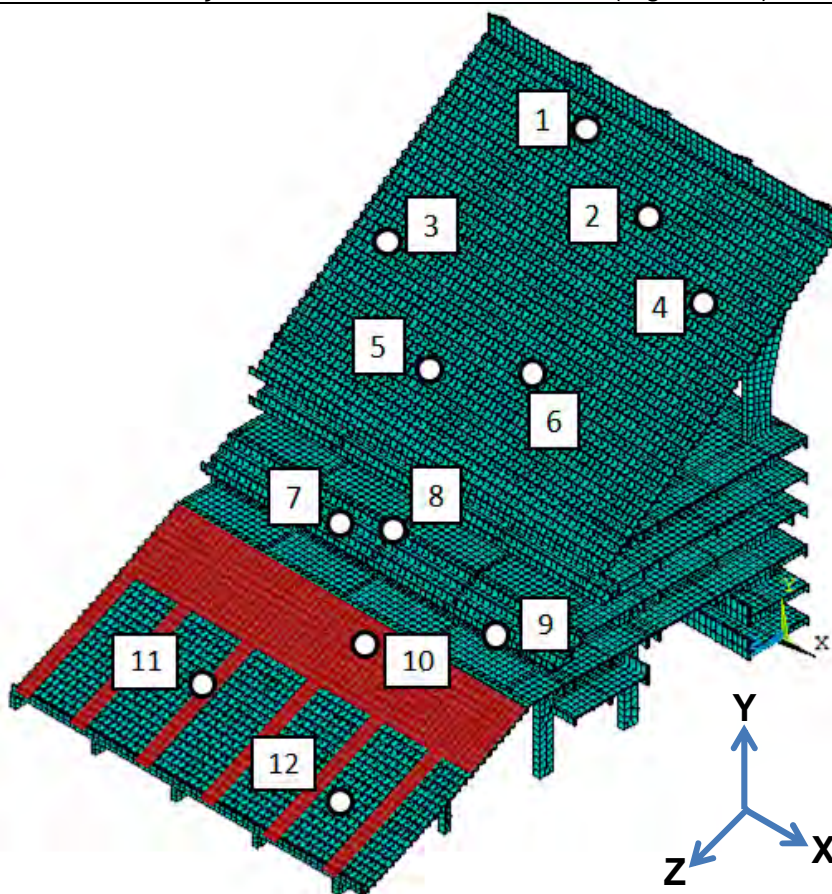




Tabela 43 - Acelerações verticais máximas: SC-14 (Figura 138)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,016	0,008	0,030
2	0,018	0,009	0,035
3	0,014	0,012	0,034
4	0,016	0,010	0,027
5	0,005	0,002	0,007
6	0,007	0,004	0,011
7	0,003	0,003	0,041
8	0,018	0,007	0,043
9	0,004	0,002	0,056
10	0,043	0,039	0,245
<b>11</b>	<b>0,116</b>	<b>0,072</b>	<b>0,277</b>
12	0,018	0,014	0,073

Ilustração da situação estudada

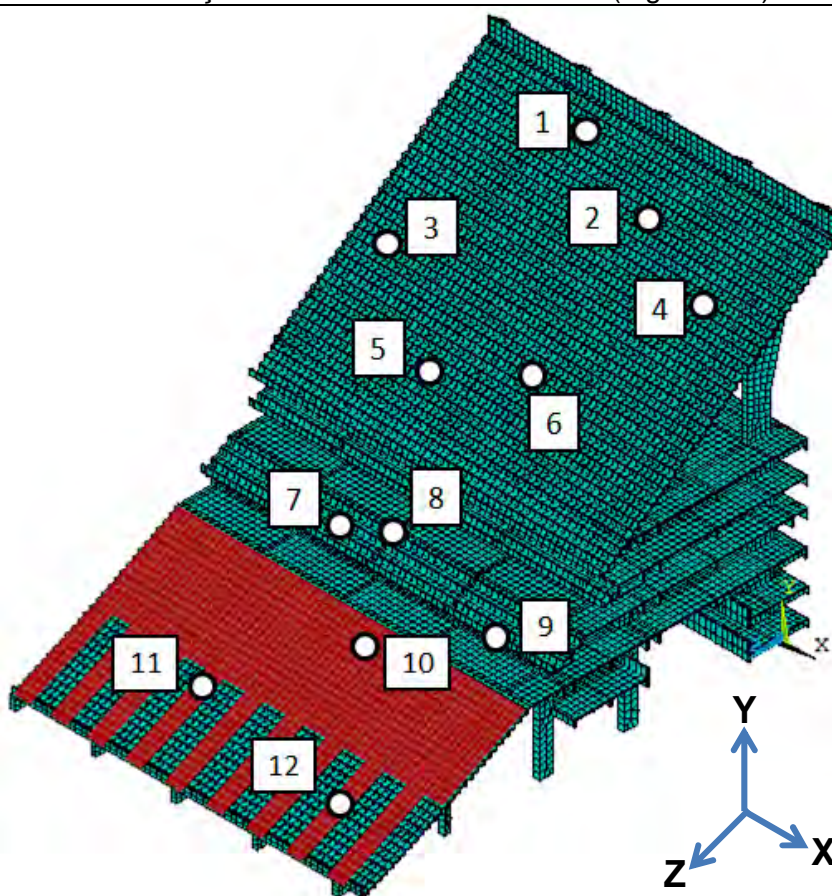


Tabela 44 - Acelerações verticais máximas: SC-15 (Figura 139)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p(\text{pico})$	$a_{w,rms} (rms)$	
1	0,015	0,008	0,036
2	0,017	0,008	0,039
3	0,014	0,010	0,027
4	0,017	0,011	0,033
5	0,004	0,002	0,005
6	0,006	0,003	0,008
7	0,003	0,003	0,039
8	0,015	0,006	0,050
9	0,004	0,003	0,064
10	0,046	0,045	0,256
<b>11</b>	<b>0,151</b>	<b>0,087</b>	<b>0,287</b>
12	0,023	0,020	0,100

Ilustração da situação estudada

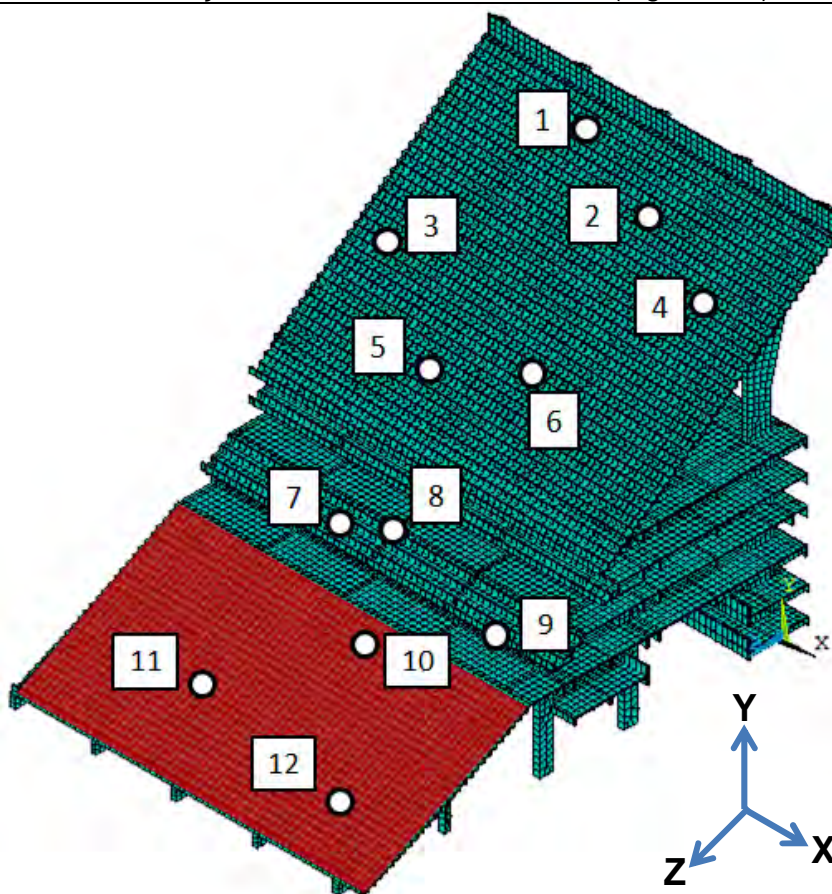
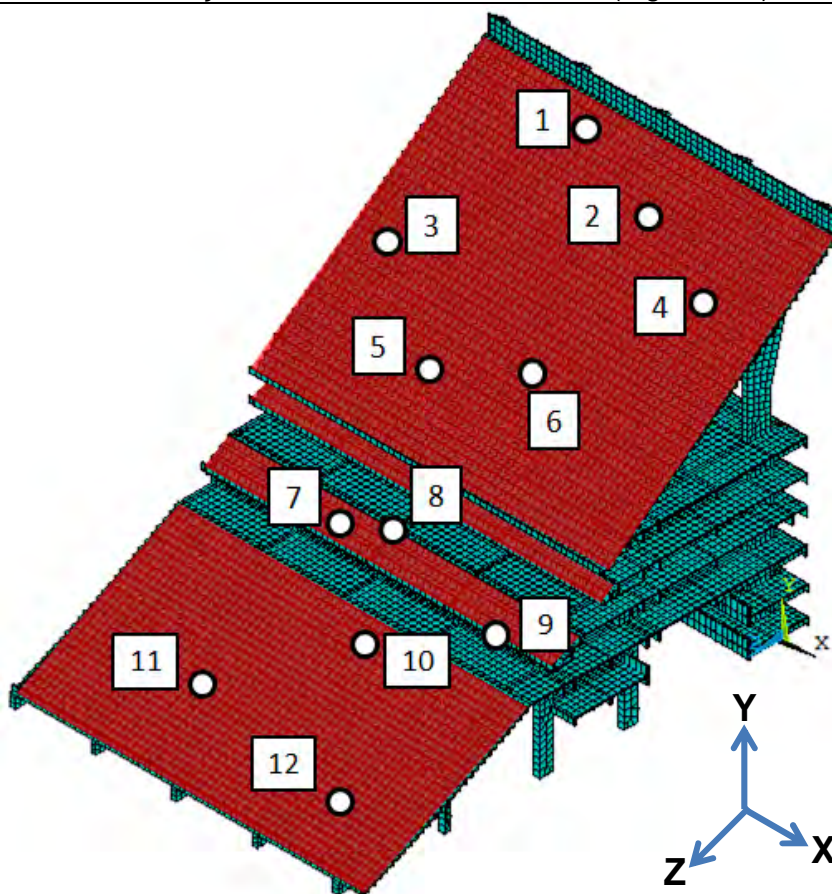


Tabela 45 - Acelerações verticais máximas: SC-16 (Figura 140)

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,rms}$ (rms)	
1	0,090	0,059	0,158
2	0,058	0,034	0,074
3	0,103	0,055	0,113
<b>4</b>	<b>0,310</b>	<b>0,159</b>	<b>0,384</b>
5	0,044	0,040	0,148
6	0,146	0,096	0,317
7	0,020	0,018	0,057
8	0,045	0,034	0,092
9	0,008	0,007	0,067
10	0,040	0,038	0,254
11	0,138	0,102	0,290
12	0,022	0,020	0,101

Ilustração da situação estudada



Os valores de aceleração de pico, *rms* e em valores de doses de vibração (VDV) mais elevados foram encontrados na situação de carregamento SC-16 (Figura 140), que possui taxa de ocupação de 100% em todos os níveis das arquibancadas (arquibancada superior, camarote e arquibancada inferior). Os valores encontrados foram da ordem de  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ),  $0,159\text{m/s}^2$  ( $a_{rms}=0,159\text{m/s}^2$ ) e  $0,384\text{m/s}^{1,75}$  ( $\text{VDV}=0,384\text{m/s}^{1,75}$ ), respectivamente, no ponto de leitura 4 (Figura 141), que está localizado no centro do 4º vão, entre a 4ª e 5ª vigas, no 9º degrau da arquibancada superior.

A situação de carregamento com taxa de ocupação de 100% sobre a arquibancada superior (SC-5; ver Figura 129) apresentou o valor máximo de  $0,290\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,290\text{m/s}^2$ ) para aceleração de pico, enquanto na situação com taxa de ocupação de 100% sobre o camarote (SC-10; ver Figura 134), o valor máximo da aceleração de pico foi de  $0,021\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,021\text{m/s}^2$ ). Já na situação de carregamento com taxa de ocupação de 100% sobre a arquibancada inferior (SC-15; ver Figura 139), a aceleração de pico máxima encontrada foi de  $0,151\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,151\text{m/s}^2$ ).

Com relação à aceleração *rms*, para a situação SC-5 (100% de ocupação sobre a arquibancada superior; ver Figura 129), o valor máximo encontrado foi de  $0,158\text{m/s}^2$  ( $a_{rms}=0,158\text{m/s}^2$ ), para a situação SC-10 (100% de ocupação sobre o camarote; ver Figura 134) foi de  $0,015\text{m/s}^2$  ( $a_{rms}=0,015\text{m/s}^2$ ) e para a situação SC-15 (100% de ocupação sobre a arquibancada inferior; ver Figura 139) foi de  $0,087\text{m/s}^2$  ( $a_{rms}=0,087\text{m/s}^2$ ).

O valor máximo encontrado para a aceleração em valores de doses de vibração (VDV), na situação SC-5 (100% de ocupação sobre a arquibancada superior; ver Figura 129) foi de  $0,376\text{m/s}^{1,75}$  ( $\text{VDV}=0,376\text{m/s}^{1,75}$ ), na situação SC-10 (100% de ocupação sobre o camarote; ver Figura 134) foi de  $0,105\text{m/s}^{1,75}$  ( $\text{VDV}=0,105\text{m/s}^{1,75}$ ) e na situação SC-15 (100% de ocupação sobre a arquibancada inferior; ver Figura 139) foi de  $0,287\text{m/s}^{1,75}$  ( $\text{VDV}=0,287\text{m/s}^{1,75}$ ).

As situações de carregamento com a menor taxa de ocupação (SC-1, SC-6 e SC-11: 12,5% de taxa de ocupação) apresentaram os menores valores para as acelerações de pico, *rms* e em valores de doses de vibração (VDV).

Estes valores máximos obtidos para aceleração de pico, *rms* e em valores de doses de vibração (VDV) foram encontrados no ponto de leitura 4 para as situações de carregamento SC-1 a SC-5 e SC-16, no ponto de leitura 8 para as situações de

carregamento SC-6 a SC-10 e no ponto de leitura 11 para as situações de carregamento SC-11 a SC-15 (pontos de leitura: ver Figura 141).

A partir da avaliação dos resultados presentes nas Tabelas 30 a 45 também é possível observar que valores de aceleração de pico, aceleração *rms* e aceleração em valores de doses de vibração (VDV), inclusive para a situação mais crítica (SC-16) são pouco expressivos, uma vez que o valor da massa total da arquibancada é muito superior ao valor da massa do carregamento dinâmico humano.

As respostas dinâmicas obtidas nos pontos de leitura que não estão situados nos setores onde o carregamento está atuando não são expressivas para a avaliação do comportamento dinâmico global da arquibancada, do ponto de vista do conforto humano. Por exemplo, nas situações de carregamento SC-1 a SC-5, onde a ocupação está somente sobre a arquibancada superior, os resultados obtidos nos pontos de leitura presentes no camarote e na arquibancada inferior (pontos de leitura 7 a 12) não são significativos.

Cabe ressaltar que a modelagem biodinâmica proposta simula numericamente a interação dinâmica indivíduo-estrutura levando em consideração o efeito do amortecimento inerente à presença das pessoas sobre o sistema estrutural, apresentando assim uma tendência a fornecer valores de respostas dinâmicas menos conservadores.

Estudos anteriores (CAMPISTA; SILVA, 2018a; CAMPISTA; SILVA, 2018b) demonstram que o modelo biodinâmico apresenta uma tendência de fornecer respostas dinâmicas mais realistas, do ponto de vista quantitativo, quando comparado com modelos de carregamento dinâmico provenientes de funções matemáticas, que levam em consideração a aplicação da força diretamente sobre a estrutura.

## 7.5 Análise do conforto humano

A avaliação do conforto humano é realizada com o objetivo de investigar se as situações de carregamento mais desfavoráveis, ou seja, com maior taxa de ocupação, podem causar desconforto nas pessoas ocupantes do sistema estrutural.

Diversas normas e recomendações de projeto estabelecem critérios quanto aos valores limites de aceitação para atividades humanas rítmicas. Isto é, não

existe um único critério consensual para realizar a avaliação do conforto humano, levando em consideração os aspectos subjetivos que envolvem essa avaliação.

Neste estudo, para as acelerações de pico foi utilizado o limite estabelecido por Murray et al. (2016), que utiliza a faixa limite de 0,40m/s<sup>2</sup> a 0,70m/s<sup>2</sup>. Com relação aos limites utilizados para as acelerações em *rms*, foram considerados neste estudo os limites estabelecidos pela ISO 2631/1 (1997) (ver Tabela 46) e por Smith et al. (2009) (ver Tabela 47). Por fim, para as acelerações em valores de doses de vibração (VDV), os limites considerados foram os estabelecidos por Setareh (2012), que se encontra na Tabela 48, e por Ellis e Littler (2004), presente na Tabela 49.

Tabela 46 - Limites de aceleração em *rms* (ISO 2631/1, 1997)

Limites de aceleração em <i>rms</i> (m/s <sup>2</sup> )	Reação
< 0,315	Não desconfortável
0,315 – 0,63	Um pouco desconfortável
0,5 – 1,0	Bastante desconfortável
0,8 – 1,6	Desconfortável
1,25 – 2,5	Muito desconfortável
> 2,0	Extremamente desconfortável

Tabela 47 - Limites de aceleração em *rms* (SCI, 2009)

Limites de aceleração em <i>rms</i> (m/s <sup>2</sup> )	Reação
< 0,35	Limite aceitável
0,35 – 1,27	Perturbador
1,27 – 2,47	Inaceitável
> 2,47	Provável condição de pânico

Tabela 48 - Limites de aceleração em VDV (SETAREH, 2012)

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

Tabela 49 - Limites de aceleração em VDV (ELLIS; LITTLER, 2004)

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 valores de aceleração presentes nas Tabelas 30 a 45 foram comparados com os limites considerados neste estudo, para uma avaliação do nível de conforto humano da arquibancada investigada. A Tabela 50 apresenta um resumo dos máximos valores de aceleração encontrados nas dezesseis situações de carregamento, no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica.

Tabela 50 - Acelerações verticais máximas

Situação de carregamento	Ponto de leitura de maior amplitude	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$a_{rms}$ ( $m/s^2$ )	VDV ( $m/s^{1,75}$ )
SC-1	4	0,094	0,074	0,175
SC-2	4	0,124	0,105	0,240
SC-3	4	0,216	0,122	0,293
SC-4	4	0,270	0,146	0,305
SC-5	4	0,290	0,158	0,376
SC-6	8	0,005	0,004	0,018
SC-7	8	0,007	0,005	0,020
SC-8	8	0,012	0,010	0,043
SC-9	8	0,019	0,015	0,082
SC-10	8	0,021	0,015	0,105
SC-11	11	0,029	0,023	0,202
SC-12	11	0,065	0,043	0,226
SC-13	11	0,075	0,055	0,231
SC-14	11	0,116	0,072	0,277
SC-15	11	0,151	0,087	0,287
SC-16	4	0,310	0,159	0,384

Todos os valores de aceleração de pico obtidos nos doze pontos de leitura se encontram abaixo da faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida por Murray (2016) em todas as dezesseis situações de carregamento. O mesmo ocorreu para os limites estabelecidos pela ISO 2631/1 (1997) e SCI (2009) para as acelerações *rms*, ou seja, os valores encontrados não ultrapassam os valores limites aceitáveis. Com relação às acelerações em valores de doses de vibração (VDV), os limites aceitáveis estabelecidos por Setareh (2012) e Ellis e Littler (2004) também não foram ultrapassados, nos doze pontos de leitura. Todos esses valores encontrados ao longo dessa investigação atendem aos critérios de conforto humano.

## 7.6 Análise dos resultados: sistemas biodinâmicos *versus* modelos de "força dura"

As respostas dinâmicas obtidas no presente trabalho, a partir da utilização da modelagem biodinâmica para o carregamento proveniente de atividade humana (torcida), para uma análise comparativa, foram confrontadas com os resultados obtidos por dois diferentes modelos de carregamento dinâmico provenientes de funções matemáticas (modelos de "força dura"), o primeiro modelo foi desenvolvido por Faisca (2003) e o segundo modelo foi proposto pelo SCI (2009).

### 7.6.1 Parâmetros utilizados no modelo biodinâmico proposto

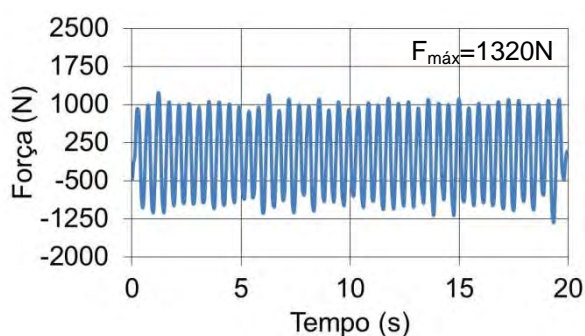
A modelagem biodinâmica proposta, conforme já mencionado no capítulo 3, leva em consideração a utilização de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL) para simular numericamente a interação dinâmica indivíduo-estrutura. Os Algoritmos Genéticos (AG) foram empregados para a resolução de um problema tradicional de otimização, via MATLAB (2017) para a determinação das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos, tomando como base os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados.

Os valores de massa, rigidez e amortecimento encontrados (Tabela 18 e Apêndice A) foram posteriormente implementados na equação de equilíbrio dinâmico (Equação (40)), em conjunto com os valores de aceleração, velocidade e deslocamento, obtidos nos testes experimentais. Deste modo, o programa MATLAB (2017) foi usado para obter o espectro da força otimizada produzida pelas 100 (Cem)

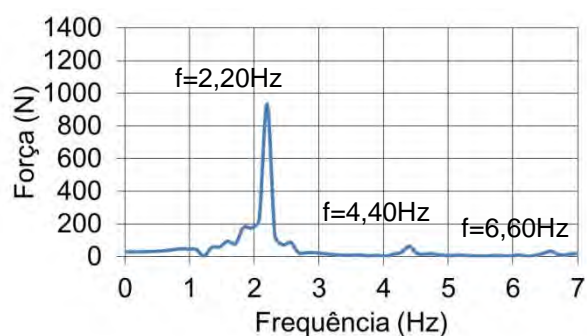


peças participantes dos ensaios experimentais, no domínio do tempo e no domínio da frequência. As Figuras 174 a 178 apresentam os espectros da força otimizada de 5 (Cinco) das 100 (Cem) peças participantes dos ensaios experimentais.

$$F_i(t) = k_i \cdot x_i(t) + c_i \cdot v_i(t) + m_i a_i(t) \quad (40)$$

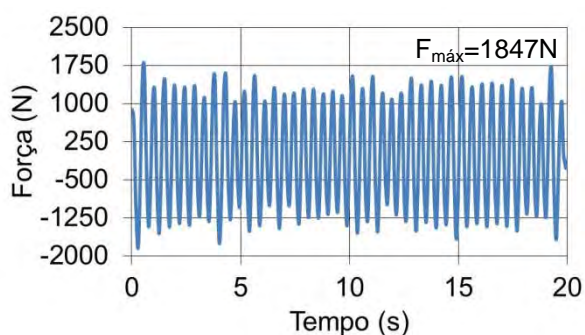


a) Domínio do tempo

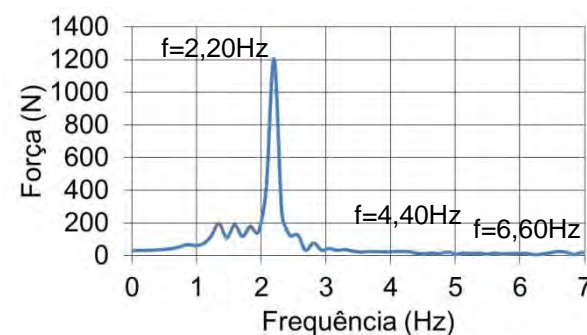


b) Domínio da frequência

Figura 174 - Força otimizada: Pessoa 1 (m=92,70kg)

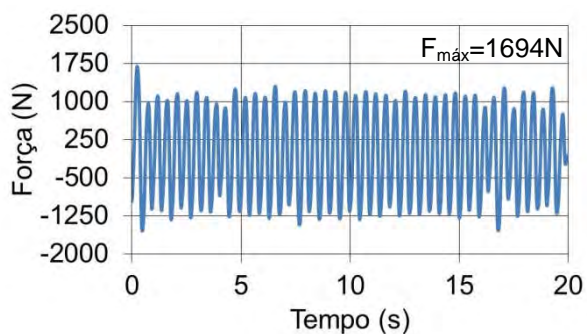


a) Domínio do tempo

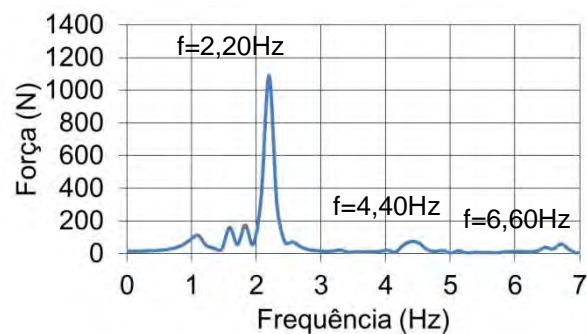


b) Domínio da frequência

Figura 175 - Força otimizada: Pessoa 4 (m=103,20kg)

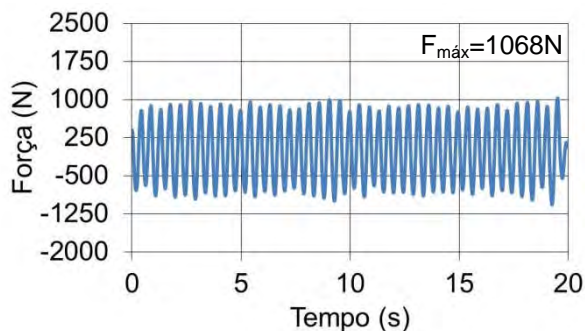


a) Domínio do tempo

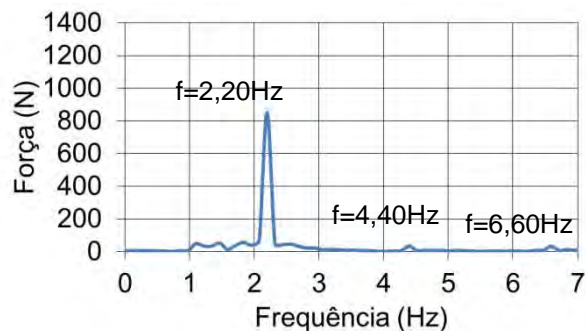


b) Domínio da frequência

Figura 176 - Força otimizada: Pessoa 7 (m=82,65kg)

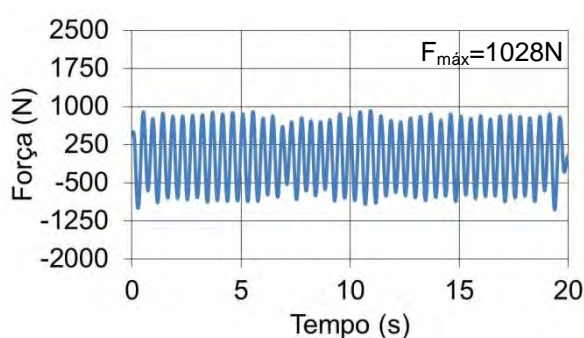


a) Domínio do tempo

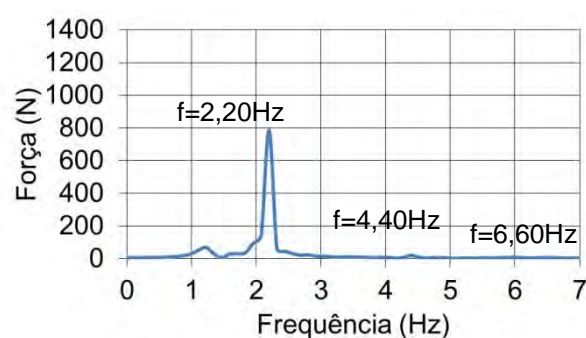


b) Domínio da frequência

Figura 177 - Força otimizada: Pessoa 10 (m=68kg)



a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

Figura 178 - Força otimizada: Pessoa 16 (m=59,70kg)

### 7.6.2 Parâmetros utilizados no modelo de "força dura" desenvolvido por Faisca (2003)

O modelo de carregamento desenvolvido por Faisca (2003) possui como objetivo simular as excitações dinâmicas humanas rítmicas, através do emprego da Função Hanning, para descrever matematicamente esse tipo de carregamento. A representação matemática desse tipo de carregamento dinâmico é expressa pela equação (41).

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[ 0,5 - 0,5 \cos \left( \frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\} \quad \text{Para } t \leq T_c$$

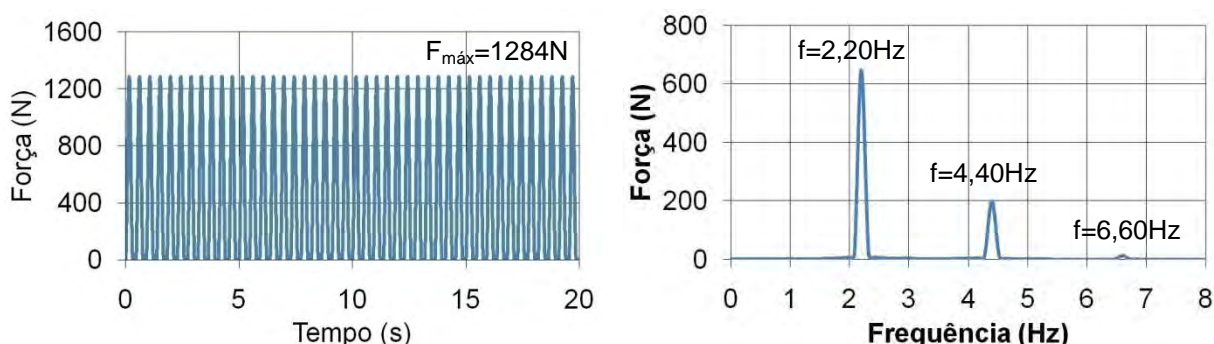
$$F(t) = 0 \quad \text{Para } T_c \leq t \leq T$$
(41)

Onde  $F(t)$ : representação matemática do carregamento no tempo em (N); CD: coeficiente de defasagem;  $K_p$ : coeficiente de impacto; P: peso da pessoa em (N); T: período da atividade em (s);  $T_c$ : período de contato da atividade em (s); t: tempo em (s).

Neste trabalho, os parâmetros de entrada da função Hanning ( $CD$ ,  $K_p$  e  $T_c$ ), foram considerados tomando como base os valores presentes na Tabela 3 (presente na seção 1.2) referentes a atividade de saltos à vontade. Tal consideração foi realizada uma vez que a frequência de 2,20Hz adotada como frequência de excitação do carregamento humano corresponde a um período (T) de 0,45s, sendo este valor de período considerado na atividade de saltos à vontade, de acordo com a referida tabela.

O valor de 0,32 foi adotado como o período de contato da atividade ( $T_c$ ), enquanto foi utilizado o valor de 3,24 para o coeficiente de impacto ( $K_p$ ). Com relação ao coeficiente de defasagem (CD), foram utilizados dois diferentes valores tomando como base a análise da Figura 10 (presente na seção 1.2). Nas situações de carregamento SC-1 a SC-5 e SC-7 a SC-16 foi considerado o valor de 0,55 e na situação de carregamento SC-6 foi utilizado o valor de 0,58.

O peso (P) foi calculado se considerando um valor médio de massa do ser humano de 74kg, que foi obtido a partir do cálculo da média da massa das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios experimentais. As Figuras 179 e 180 apresentam os sinais de força encontrados ao se considerar os parâmetros adotados, nos domínios do tempo e da frequência.



a) Domínio do tempo

b) Domínio da frequência

Figura 179 - Força: situações de carregamento SC-1 a SC-5 e SC-7 a SC-16 ( $T=0,45s$ ,  $T_c=0,32s$ ,  $K_p=3,24$  e  $CD=0,55$ )

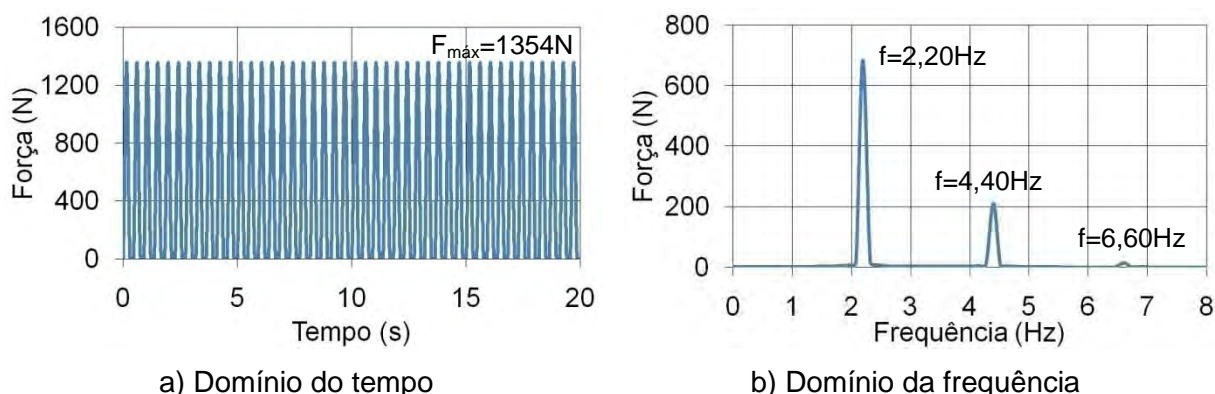


Figura 180 - Força: situação de carregamento SC-6 ( $T=0,45\text{s}$ ,  $T_c=0,32\text{s}$ ,  $K_p=3,24$  e  $CD=0,58$ )

### 7.6.3 Parâmetros utilizados no modelo de "força dura" presente no SCI (2009)

Ellis e Ji (2004a) desenvolveram o modelo de carregamento de "força dura" presente no SCI (2009) levando em consideração a carga de multidão existente em estruturas durante a prática de atividades humanas rítmicas. A representação matemática do carregamento está expressa na equação (42).

$$F(t) = G \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_{n,v} \cdot \text{sen}(2n\pi f_p t + \phi_n) \right\} \quad (42)$$

Onde  $F$ : representação matemática do carregamento no tempo em (N);  $G$ : peso de uma pessoa em (N);  $r_{n,v}$ : coeficiente de Fourier induzida por  $v$  pessoas;  $n$ : número de termos de Fourier;  $v$ : número de pessoas;  $\phi_n$ : diferença de fase;  $f_p$ : frequência do carregamento;  $t$ : tempo (s).

Do mesmo modo que foi considerado para o modelo desenvolvido por Faisca (2003), o peso ( $G$ ) foi calculado através do emprego de um valor médio de massa do ser humano de 74kg, que representa a média da massa das 100 (Cem) pessoas que participaram dos ensaios experimentais.

Com base nos valores apresentados na Tabela 4 (presente na seção 1.2) referentes à atividade de saltos normais, a diferença de fase ( $\phi_n$ ) foi determinada. No cálculo dos coeficientes de Fourier foi considerado um número de pessoas ( $v$ ) igual a 43, para a situação de carregamento SC-6, e igual a 86 para a situação de carregamento SC-7. Por fim, foi utilizado um número de pessoas ( $v$ ) igual a 100 para

as situações de carregamento SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16 levando em consideração a análise do gráfico apresentado na Figura 11 (presente na seção 1.2). Nesse gráfico verifica-se que, aproximadamente, a partir de 100 pessoas, os coeficientes de Fourier passam a não apresentar uma redução significativa. As Figuras 181 a 183 apresentam os sinais de força, nos domínios do tempo e da frequência.

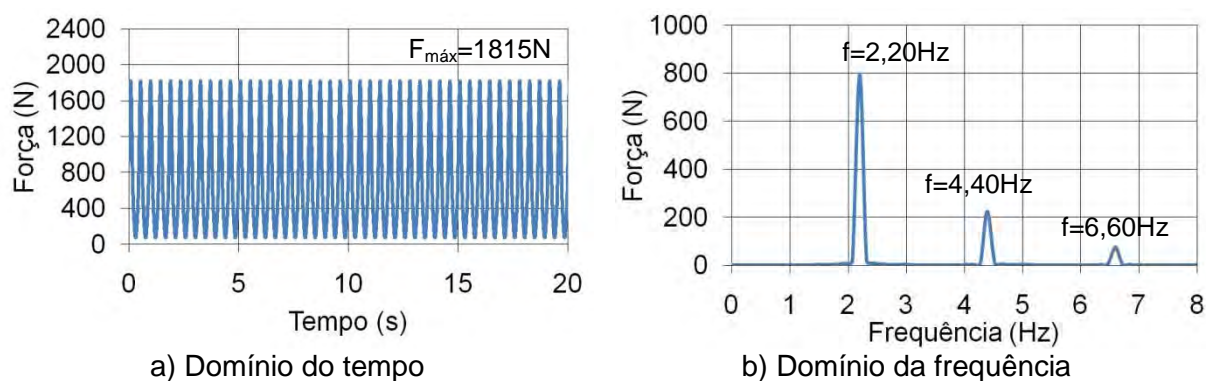


Figura 181 - Força: situações de carregamento SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16 ( $p=100$ )

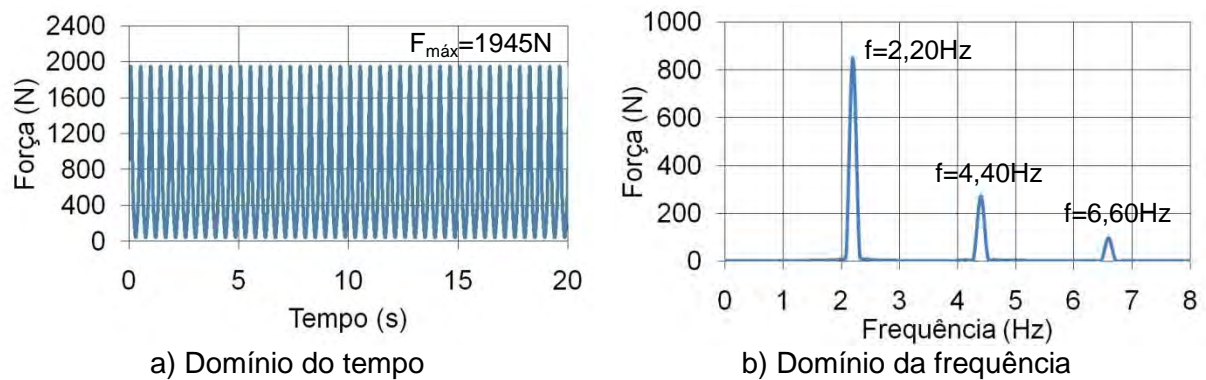


Figura 182 - Força: situação de carregamento SC-6 ( $p=43$ )

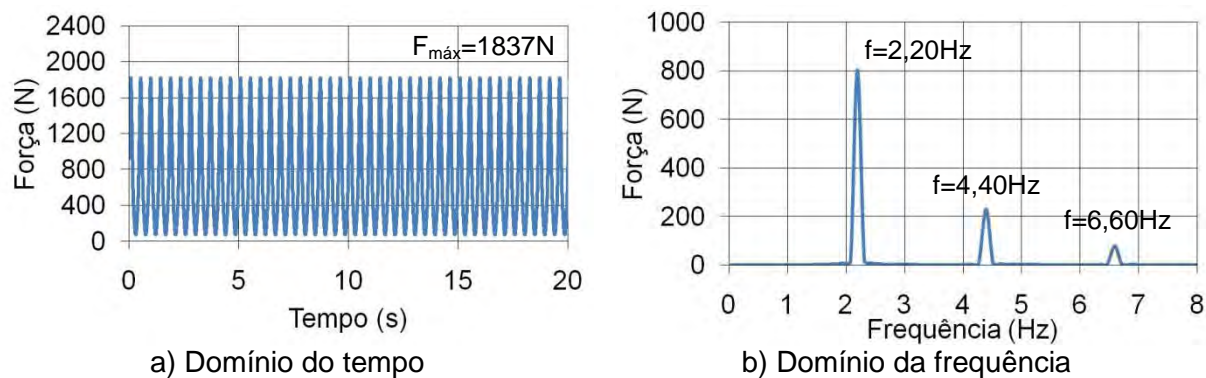


Figura 183 - Força: situação de carregamento SC-7 ( $p=86$ )

#### 7.6.4 Resultados obtidos

As Figuras 184 a 187 apresentam a resposta dinâmica em termos de aceleração, no domínio do tempo, enquanto as Figuras 188 a 191 ilustram os gráficos da aceleração no domínio da frequência, referentes às situações de carregamento mais críticas, que são as situações com 100% de taxa de ocupação da arquibancada (SC-5, SC-10, SC-15 e SC-16), no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica.

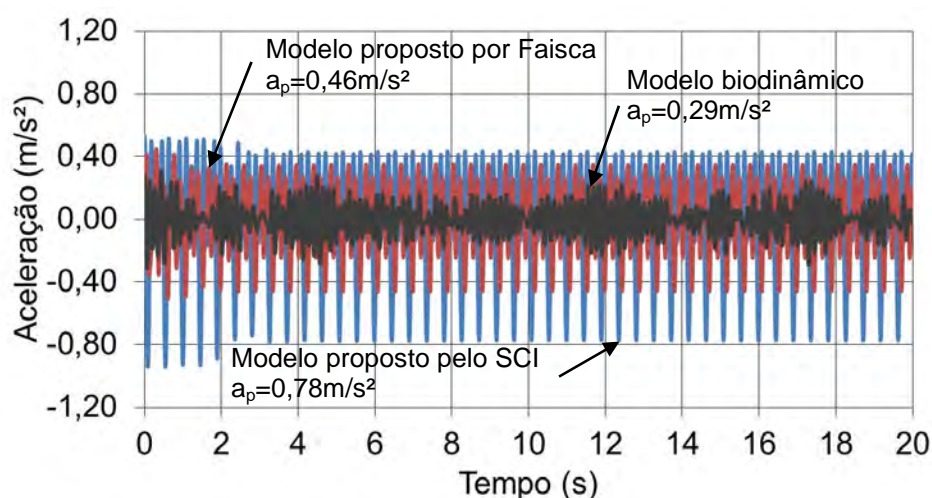


Figura 184 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-5 (ponto de análise 4)

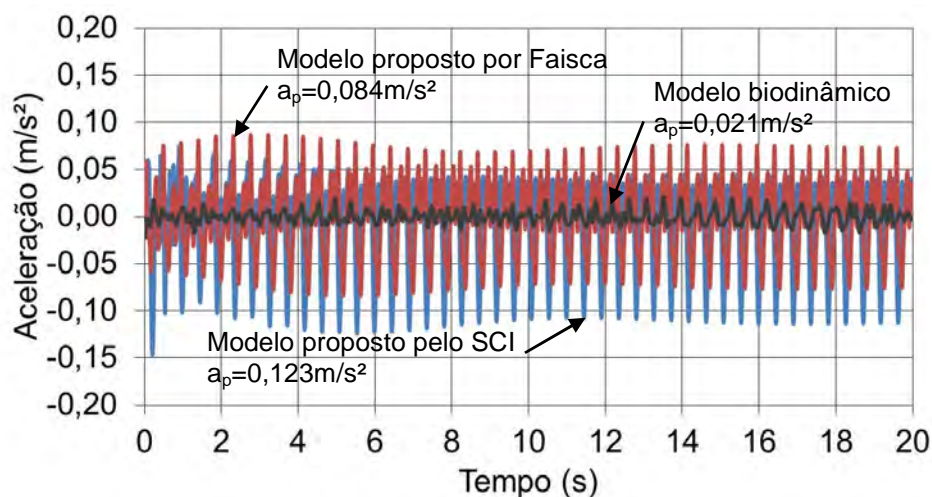


Figura 185 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-10 (ponto de análise 8)

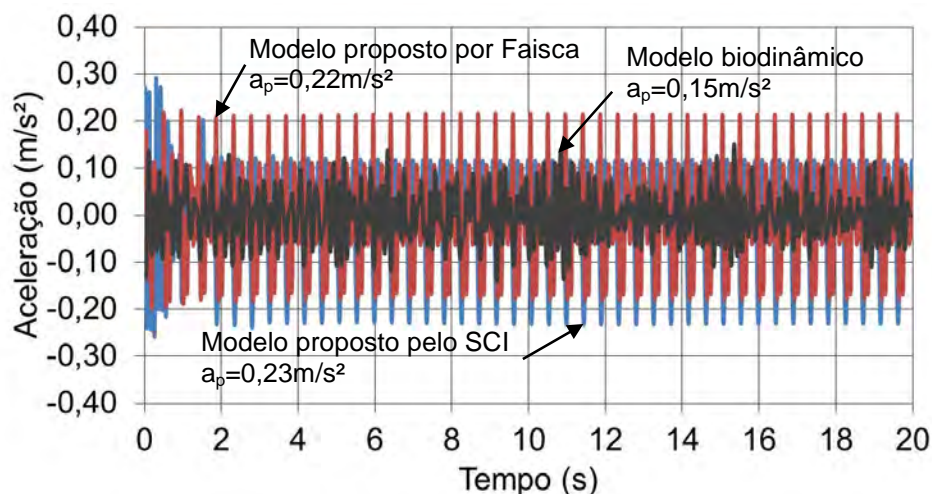


Figura 186 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-15 (ponto de análise 11)

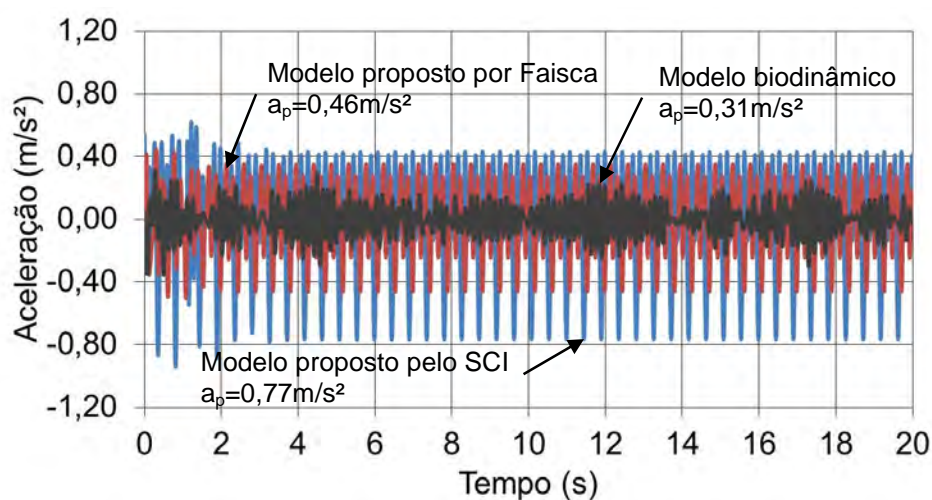


Figura 187 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-16 (ponto de análise 4)

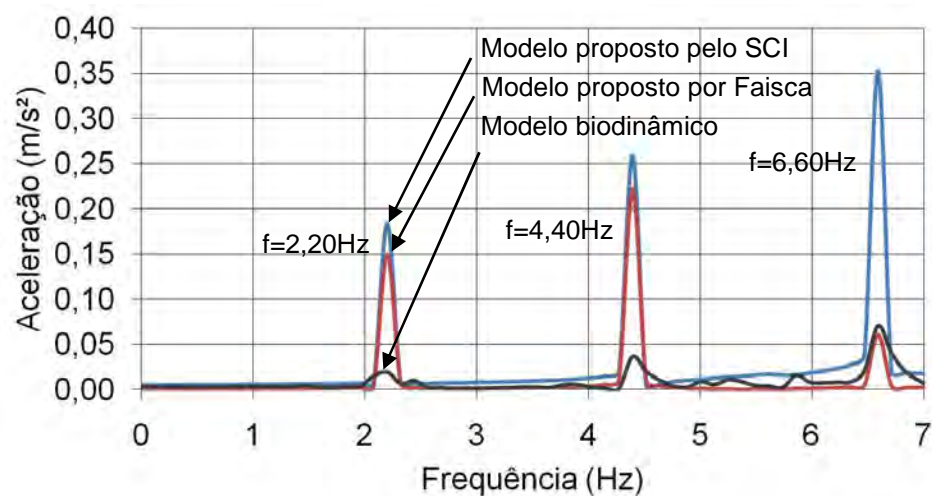


Figura 188 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-5 (ponto de análise 4)

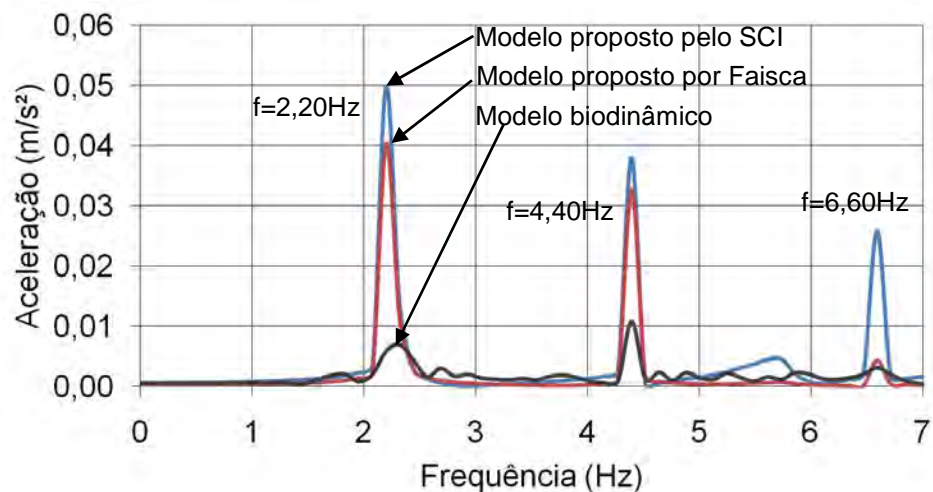


Figura 189 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-10 (ponto de análise 8)

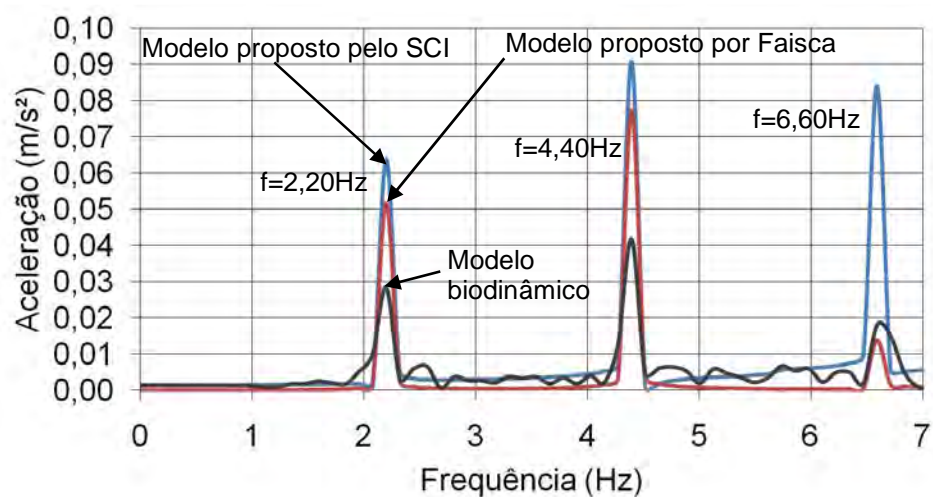


Figura 190 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-15 (ponto de análise 11)

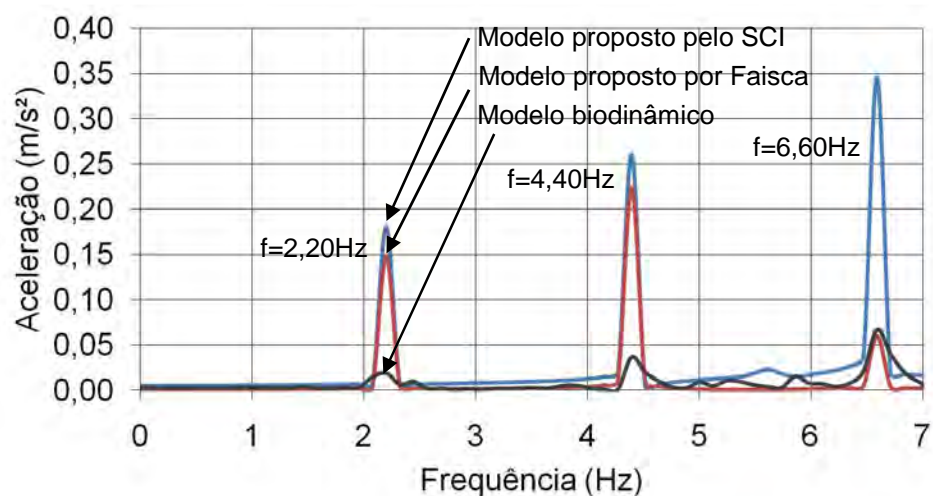


Figura 191 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-16 (ponto de análise 4)



Nas Figuras 188 a 191, observa-se que os picos onde ocorrem as maiores transferências de energia do sistema nos modelos de carregamento correspondem aos três harmônicos da excitação dinâmica humana ( $f_1=2,20\text{Hz}$ ;  $f_2=4,40\text{Hz}$  e  $f_3=6,60\text{Hz}$ ).

Verifica-se também que, nos resultados encontrados através da modelagem biodinâmica, assim como nos resultados obtidos nos modelos de carregamento propostos por Faisca (2003) e SCI (2009), ocorre um aumento no valor das acelerações à medida que a taxa de ocupação aumenta, conforme apresentado nos gráficos presentes nas Figuras 184 a 191, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

Cabe ressaltar que, a partir da análise das Figuras 184 a 191, também constata-se que o modelo biodinâmico apresenta valores de aceleração inferiores para todas as situações de carregamento estudadas quando comparados aos valores obtidos nos modelos de carregamento propostos por Faisca (2003) e SCI (2009).

Neste contexto, verifica-se ainda que a transferência de energia do sistema é menor quando se utiliza a modelagem biodinâmica, em comparação com os modelos propostos por Faisca (2003) e SCI (2009), pois a utilização de sistemas biodinâmicos para representarem a interação dinâmica indivíduos-estrutura apresenta uma tendência a fornecer valores das respostas dinâmicas menos conservadores.

As Tabelas 51 a 54 apresentam os valores máximos das acelerações de pico determinadas no modelo biodinâmico, assim como dos modelos propostos por Faisca (2003) e pelo SCI (2009). Esses valores são referentes às situações de carregamento com 100% de taxa de ocupação da arquibancada (SC-5, SC-10, SC-15 e SC-16), nos doze pontos de leitura da resposta dinâmica.

Tabela 51 - Comparativo das acelerações de pico: SC-5

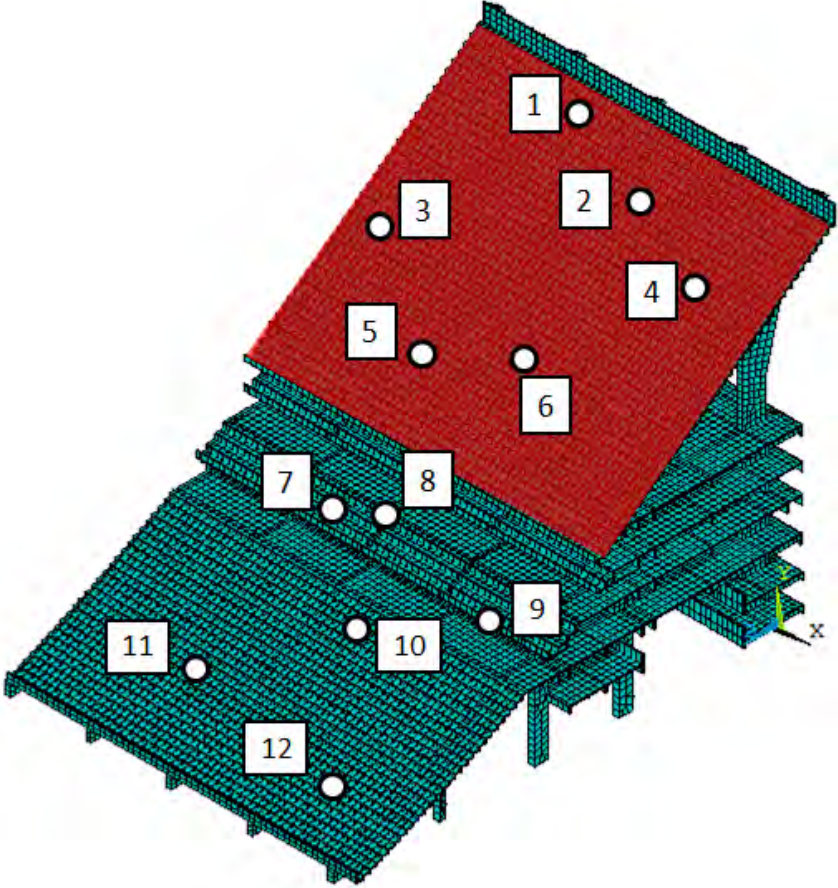
<p>Ilustração da situação estudada</p>			
<p>Ponto de leitura</p>	<p>Acelerações de pico (m/s<sup>2</sup>)</p>		
	<p>Modelo biodinâmico</p>	<p>Faisca (2003)</p>	<p>SCI (2009)</p>
<p>1</p>	<p>0,088</p>	<p>0,220</p>	<p>0,240</p>
<p>2</p>	<p>0,057</p>	<p>0,124</p>	<p>0,183</p>
<p>3</p>	<p>0,100</p>	<p>0,205</p>	<p>0,342</p>
<p>4</p>	<p><b>0,290</b></p>	<p><b>0,463</b></p>	<p><b>0,780</b></p>
<p>5</p>	<p>0,041</p>	<p>0,086</p>	<p>0,162</p>
<p>6</p>	<p>0,130</p>	<p>0,140</p>	<p>0,236</p>
<p>7</p>	<p>0,004</p>	<p>0,020</p>	<p>0,022</p>
<p>8</p>	<p>0,029</p>	<p>0,110</p>	<p>0,118</p>
<p>9</p>	<p>0,002</p>	<p>0,005</p>	<p>0,012</p>
<p>10</p>	<p>0,011</p>	<p>0,015</p>	<p>0,021</p>
<p>11</p>	<p>0,004</p>	<p>0,003</p>	<p>0,007</p>
<p>12</p>	<p>0,001</p>	<p>0,001</p>	<p>0,002</p>

Tabela 52 - Comparativo das acelerações de pico: SC-10

Ponto de leitura	Acelerações de pico (m/s <sup>2</sup> )		
	Modelo biodinâmico	Faisca (2003)	SCI (2009)
1	0,005	0,022	0,028
2	0,005	0,023	0,028
3	0,004	0,012	0,013
4	0,003	0,013	0,014
5	0,003	0,010	0,015
6	0,002	0,008	0,010
7	0,016	0,036	0,054
8	<b>0,021</b>	<b>0,084</b>	<b>0,123</b>
9	0,008	0,051	0,056
10	0,007	0,028	0,033
11	0,002	0,007	0,008
12	0,001	0,001	0,001

Ilustração da situação estudada

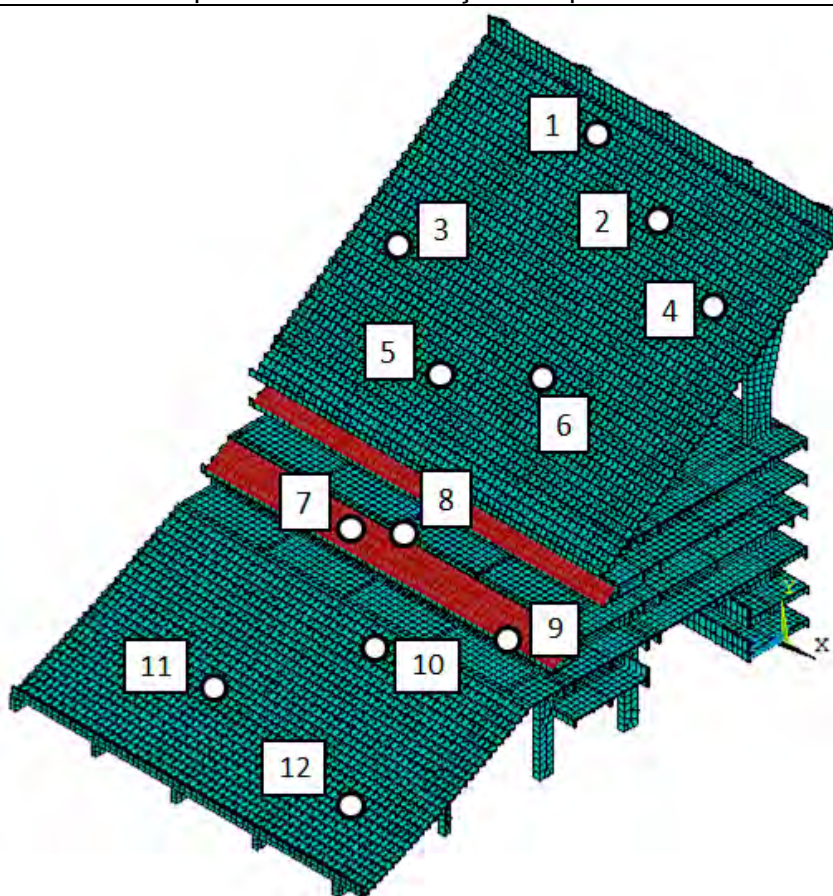


Tabela 53 - Comparativo das acelerações de pico: SC-15

Ponto de leitura	Acelerações de pico (m/s <sup>2</sup> )		
	Modelo biodinâmico	Faisca (2003)	SCI (2009)
1	0,015	0,031	0,049
2	0,017	0,026	0,058
3	0,014	0,022	0,031
4	0,017	0,025	0,038
5	0,004	0,020	0,021
6	0,006	0,021	0,040
7	0,003	0,014	0,016
8	0,015	0,056	0,071
9	0,004	0,015	0,021
10	0,046	0,155	0,161
11	<b>0,151</b>	<b>0,216</b>	<b>0,228</b>
12	0,023	0,066	0,118

Ilustração da situação estudada

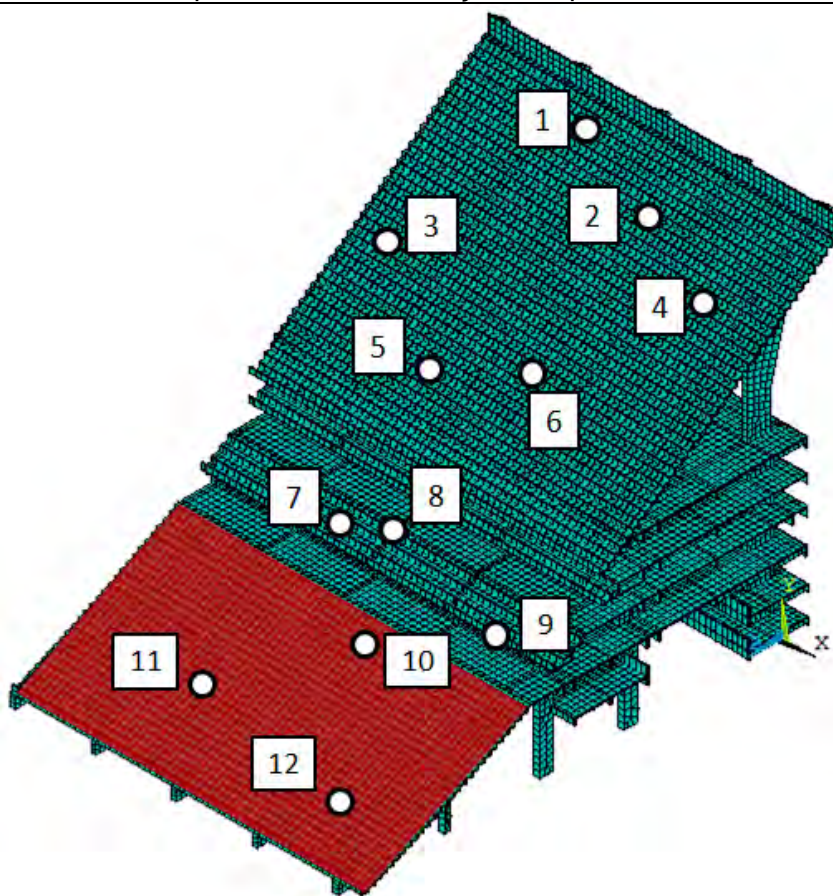
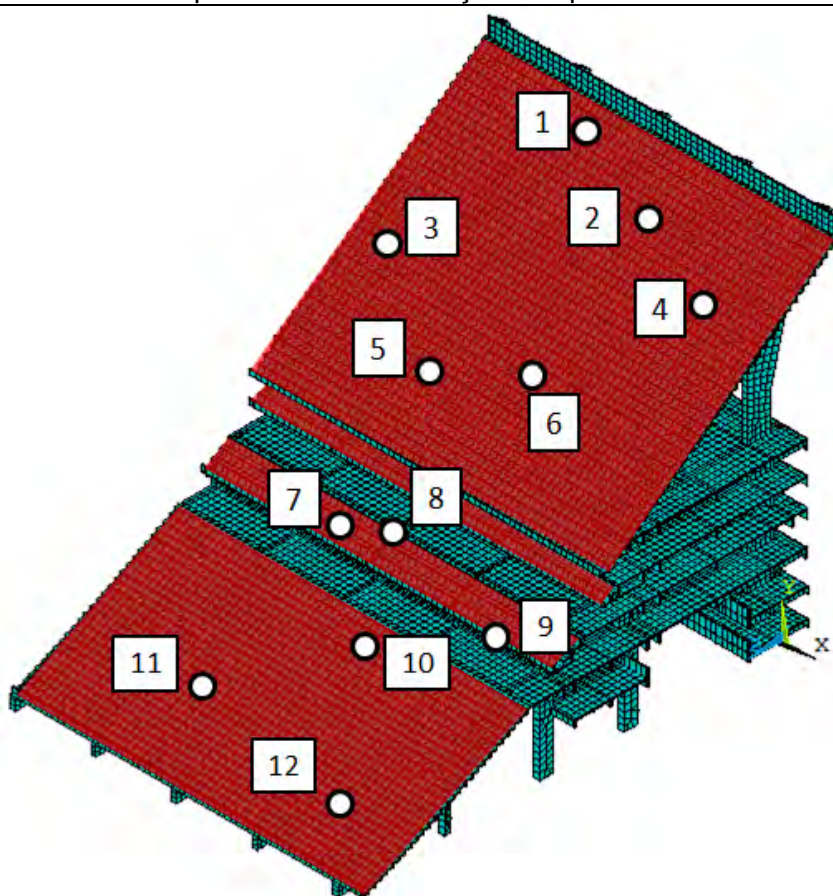


Tabela 54 - Comparativo das acelerações de pico: SC-16

Ponto de leitura	Acelerações de pico (m/s <sup>2</sup> )		
	Modelo biodinâmico	Faisca (2003)	SCI (2009)
1	0,090	0,230	0,260
2	0,058	0,148	0,191
3	0,103	0,213	0,339
4	<b>0,310</b>	<b>0,460</b>	<b>0,767</b>
5	0,044	0,104	0,178
6	0,146	0,174	0,247
7	0,020	0,057	0,082
8	0,045	0,167	0,199
9	0,008	0,042	0,054
10	0,040	0,119	0,147
11	0,138	0,217	0,240
12	0,022	0,066	0,119

Ilustração da situação estudada



A situação de carregamento SC-16 (Figura 140), que considera uma taxa de ocupação de 100% em todos os setores das arquibancadas (arquibancada superior, camarote e arquibancada inferior), apresenta os valores de aceleração de pico mais elevados, que foi da ordem de  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ) no modelo biodinâmico. Enquanto para o modelo de carregamento proposto por Faisca (2003) foi de  $0,46\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,46\text{m/s}^2$ ) e no modelo proposto pelo SCI (2009) foi de  $0,77\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,77\text{m/s}^2$ ). Esses valores foram encontrados no ponto de leitura 4, que está localizado no centro do 4º vão, entre a 4ª e 5ª vigas, no 9º degrau da arquibancada superior (Figura 141). O valor de  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ) encontrado no modelo biodinâmico corresponde a 67% do valor obtido no modelo de carregamento proposto por Faisca (2003) e 40% do valor obtido no modelo proposto pelo SCI (2009).

Tanto nos resultados presentes nas Tabelas 51 a 54, quanto nos gráficos ilustrados nas Figuras 184 a 191, o modelo biodinâmico apresenta valores de aceleração inferiores quando comparado aos valores obtidos nos modelos de carregamento propostos por Faisca (2003) e pelo SCI (2009), em todas as situações de carregamento, nos doze pontos de leitura.

Verifica-se ainda que todos os valores de aceleração de pico nos doze pontos de leitura, nas quatro situações de carregamento (SC-15, SC-10, SC-15 e SC-16), quando se utilizou a modelagem biodinâmica e o modelo de carregamento proposto por Faisca (2003) encontram-se abaixo ou dentro da faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida por Murray (2016), atendendo assim os critérios de conforto humano. Em contrapartida, os valores de aceleração de pico encontrados no ponto de leitura 4, nas situações de carregamento SC-5 e SC-16, quando se utilizou o modelo proposto pelo SCI (2009), ultrapassam a faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida por Murray (2016), portanto esse valores não atendem os critérios de conforto humano.

Neste sentido, com base nos resultados encontrados ao longo do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, e em consonância com outros autores (CAPPELLINI, 2015; SHAHABPOOR; PAVIC; RACIC, 2016; TOSO et al., 2016), a modelagem biodinâmica apresenta uma tendência a fornecer valores das respostas dinâmicas menos conservadores, uma vez que utiliza sistemas biodinâmicos para representarem a interação dinâmica indivíduos-estrutura, que levam em

consideração o efeito do amortecimento relacionado à presença das pessoas sobre a estrutura, além de incorporar naturalmente as diferenças de fase entre as pessoas.

Neste contexto, a utilização de modelos de carregamento dinâmicos provenientes de funções matemáticas, que consideram a aplicação da força diretamente sobre a estrutura, não incorporando o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura, fornece valores das respostas dinâmicas conservadores, o que pode levar a concepção de projetos estruturais antieconômicos.

### 7.7 Considerações do capítulo

No presente capítulo foram apresentados os resultados obtidos a partir da realização de análises transientes na arquibancada para as dezesseis situações de carregamento investigadas (SC-1 a SC-16). A frequência de excitação relacionada ao carregamento humano foi igual a 2,20Hz. Os resultados obtidos comprovam que as acelerações máximas de pico, *rms* e em valores de doses de vibração (VDV) ocorrem na situação de carregamento que apresentar maior ocupação da estrutura (SC-16: 100% de taxa de ocupação nos três setores). Verificou-se que a arquibancada está adequada do ponto de vista do conforto humano relacionado a vibrações. Tal verificação ocorreu a partir da comparação dos valores obtidos com os limites estabelecidos na literatura técnica. Uma análise comparativa entre os resultados obtidos através da utilização de sistemas biodinâmicos e os resultados fornecidos por dois modelos de carregamento provenientes de funções matemática (FAISCA, 2003; SCI, 2009) foi realizada.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 8.1 Introdução

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi o de realizar uma investigação acerca do comportamento estrutural dinâmico das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha, quando submetidas a ações dinâmicas rítmicas representativas das pessoas (torcida), no que diz respeito à avaliação do conforto humano. Neste sentido, foi proposta a utilização de sistemas biodinâmicos para a modelagem das ações dinâmicas representativas das pessoas (torcida), onde a interação dinâmica indivíduo-estrutura considera o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), acoplados ao sistema estrutural, tomando como base os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ (PGECIV/FEN/UERJ).

Neste trabalho, avaliou-se o comportamento do sistema estrutural a partir da consideração de que uma das frequências naturais da estrutura corresponde à frequência de excitação do carregamento humano. Neste contexto, o valor de 2,20Hz foi escolhido como o valor da frequência de excitação do carregamento humano, onde o primeiro harmônico ( $1 \times 2,20\text{Hz} = 2,20\text{Hz}$ ) apresenta um valor que contribui para forçar um movimento ressonante da arquibancada com o segundo modo de vibração vertical ( $f_{02}=2,28\text{Hz}$ ).

Os ensaios experimentais foram realizados por 100 (Cem) indivíduos diferentes, onde cada um praticou a atividade humana rítmica (torcida) sobre uma plataforma rígida de MDF. De forma a garantir que os ensaios fossem realizados na frequência correta, um metrônomo foi utilizado, onde cada “batida” sonora era equivalente ao contato do indivíduo com a estrutura. Durante os ensaios, as medições da aceleração no centro de massa de cada pessoa foram realizadas mediante o uso de acelerômetro, enquanto as medições da força produzida pelos participantes sobre a plataforma de MDF foram realizadas através de três células de carga acopladas à plataforma.

Posteriormente, os valores de força, aceleração, velocidade e deslocamento encontrados nos ensaios experimentais foram utilizados para a determinação das



características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos, a partir da resolução matemática de um problema tradicional de otimização, via uso do programa MATLAB (2017), através do emprego de Algoritmos Genéticos (AG), onde foi necessária a solução da equação de equilíbrio dinâmico. Uma investigação a cerca da correlação entre as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos foi realizada, onde se verificou uma correlação satisfatória entre a massa, a rigidez e o amortecimento do modelo biodinâmico.

Em relação à modelagem biodinâmica proposta, os valores de aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo obtidos provenientes do carregamento humano foram aplicados sobre o grau de liberdade da massa do sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), enquanto os valores de força no domínio do tempo foram aplicados diretamente sobre o sistema estrutural da arquibancada.

A modelagem numérico-computacional do sistema estrutural, por meio do programa ANSYS (2009), foi desenvolvida, via método dos elementos finitos. Dessa forma, para a representação do pórtico, das lajes e dos degraus foi utilizado o elemento de casca SHELL63 (ANSYS, 2009). Para representar as vigas internas foi utilizado o elemento de viga BEAM44 (ANSYS, 2009). Por fim, foi utilizado o elemento de mola COMBIN40 (ANSYS, 2009) para a caracterização dos sistemas biodinâmicos representativos da interação indivíduo-estrutura.

Uma análise modal foi realizada, onde foram obtidas as frequências naturais dos dez primeiros modos de vibração para o modelo estrutural analisado quando a estrutura se encontrava vazia, além dos valores dos parâmetros dinâmicos (massa modal, rigidez modal e amortecimento modal). Além disso, também foram obtidos os valores das frequências naturais e dos parâmetros dinâmicos referentes aos dois primeiros modos de vibração para o modelo estrutural analisado quando a arquibancada estava ocupada. Cabe ressaltar que a ocupação das arquibancadas foi realizada por meio de sistemas biodinâmicos, em que o ser humano é representado parado e em pé.

Na realização da análise transiente, dezesseis diferentes situações de carregamentos foram estudadas com o objetivo de ser realizada uma avaliação da resposta dinâmica do sistema estrutural, onde foram obtidos os valores de deslocamento e aceleração nos domínios do tempo e da frequência. Deste modo, o

conforto humano foi avaliado, onde as acelerações foram avaliadas com base nas acelerações de pico obtidas no regime permanente, nas acelerações *rms* e nas acelerações em valores de dose de vibração (VDV).

Finalmente, para efeito comparativo, os valores das acelerações de pico obtidos a partir da utilização da modelagem dos sistemas biodinâmicos foram confrontados com os resultados obtidos com base na utilização de dois modelos tradicionais de carregamento dinâmico ("força dura"), provenientes de funções matemáticas (FAISCA, 2003; SCI, 2009).

## 8.2 Conclusões Alcançadas

### a) Modelagem dos sistemas biodinâmicos

Com base na realização dos testes experimentais, mediante a participação de 100 (Cem) indivíduos, os valores obtidos para força, aceleração, velocidade e deslocamento foram utilizados para a determinação das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos, a partir da realização de um processo otimização, via utilização de Algoritmos Genéticos (AG).

A partir da obtenção das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos foram determinados 100 (Cem) diferentes valores de força dinâmica otimizada, referentes a cada um dos ensaios experimentais realizados. Neste contexto, com o objetivo de validar os valores encontrados, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson e deste modo foi verificada a existência de uma correlação satisfatória entre o valor de força dinâmica obtida experimentalmente e o valor da força otimizada. Essa correlação foi avaliada nos domínios do tempo e da frequência, o que demonstra que a força otimizada encontrada se ajusta aos valores das ações dinâmicas obtidas nos ensaios experimentais realizados.

O coeficiente de correlação de Pearson também foi utilizado para verificar a correlação existente nas relações massa-rigidez, massa-amortecimento e rigidez-amortecimento. Nesse sentido, cabe destacar também que foram encontradas correlações bastante satisfatórias entre as referidas características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos desenvolvidos ao longo deste estudo.

Estas comprovações associadas a correlação experimental-numérica asseguram a realização adequada dos testes experimentais, além da eficiência do

processo de otimização utilizado no presente trabalho, além de contribuir favoravelmente para a modelagem numérica dos sistemas biodinâmicos representativos da ação dinâmica humana (torcida).

Neste sentido, cabe ressaltar que uma das principais contribuições do presente trabalho está relacionada à obtenção das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos tendo em mente os resultados obtidos em ensaios experimentais que consideram as pessoas saltando, ou seja, durante a prática da atividade humana rítmica (torcida).

#### b) Análise modal

Verifica-se que a frequência fundamental da arquibancada ( $f_{01}=0,97\text{Hz}$ ) se encontra abaixo do valor estabelecido pela NBR 6118 (2014) ( $f_n > 1,2f_{\text{crítica}}$ ), que para este tipo de estrutura deve ser no mínimo igual a 9,6Hz. Nesse sentido, a análise modal realizada na arquibancada revela uma possibilidade da estrutura apresentar problemas relacionados à vibrações excessivas.

Com base na avaliação do comportamento dinâmico do sistema estrutural, via emprego dos sistemas biodinâmicos, considerando-se as pessoas (torcida) representadas numericamente, em pé e paradas sobre as arquibancadas, foi observado que os valores de frequência natural, massa modal, rigidez modal e amortecimento modal são alterados devido à ocupação do sistema estrutural, em relação ao sistema sem a consideração da presença das pessoas. Os valores de frequência natural, massa modal e rigidez modal diminuíram à medida que a ocupação da arquibancada aumentou, com variações pouco expressivas e inferiores a 1%. Todavia, o valor amortecimento modal aumentou quando ocorreu um aumento de ocupação da estrutura, com variações mais significativas, da ordem de 10%, o que contribui favoravelmente para a posterior avaliação do conforto humano do sistema investigado.

Verificou-se, também, que a relação  $M_p/M_e$  ( $M_p$ : massa das pessoas;  $M_e$ : massa das arquibancadas), considerando-se uma pessoa ( $m=74\text{kg}$ ) sobre a estrutura é igual a 0,00005. Ao considerar uma ocupação de 4.161 pessoas sobre a arquibancada (SC-16: 100% de ocupação em todos os setores; ver Figura 140), a relação  $M_p/M_e$  passa a ser de 0,20. Portanto, resalta-se, tomando como base os resultados obtidos ao longo desta investigação, a necessidade de se avaliar

experimentalmente a arquibancada real, para a consolidação dos valores obtidos de acordo com a metodologia de análise desenvolvida neste estudo, os quais estão em concordância com os resultados obtidos por diversos pesquisadores (BROWNJOHN, 1999; HE et al., 2017; SHAHABPOOR et al., 2017), tendo em mente que o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura (torcida-arquibancada) pode ser significativo, dependendo da relação  $M_p/M_e$ .

c) Resposta dinâmica: modelagem biodinâmica e estudo do conforto humano

Os valores máximos de deslocamentos e de acelerações foram determinados para as situações de carregamento com 100% de taxa de ocupação em cada setor específico das arquibancadas (situações de carregamento: SC-5, SC-10 e SC-15; ver Figuras 129, 134 e 139), além da situação de carregamento com 100% de ocupação em todos os setores da arquibancada (SC-16; ver Figura 140). Por outro lado, os valores mínimos obtidos (deslocamentos e acelerações) foram encontrados para as situações de carregamento com 12,5% de taxa de ocupação da arquibancada (situações de carregamento: SC-1, SC-6 e SC-11; ver Figuras 125, 130 e 135). Estas verificações corroboram para o entendimento esperado que os valores dos deslocamentos e das acelerações da arquibancada aumentam à medida que ocorre um aumento na taxa de ocupação sobre a arquibancada.

Todos os valores de deslocamento obtidos nas dezesseis situações de carregamento estudadas (situações de carregamento: SC-1 a SC-16) atendem ao valor estabelecido pela NBR 8800 (2008), que é igual a 5mm, para estruturas sujeitas à prática de atividades humanas rítmicas de forma repetitiva. Nesse contexto, o deslocamento máximo encontrado foi da ordem de 0,31mm na situação de carregamento SC-16 (100% de ocupação em todos os setores da arquibancada; ver Figura 140).

Os valores de aceleração de pico, *rms* e em valores de doses de vibração (VDV) mais elevados foram encontrados para a situação de carregamento SC-16 (Figura 140), que possui taxa de ocupação de 100% em todos os níveis da arquibancada (arquibancada superior, camarote e arquibancada inferior). Os valores encontrados ao longo do estudo foram da ordem de  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ),  $0,159\text{m/s}^2$  ( $a_{rms}=0,159\text{m/s}^2$ ) e  $0,384\text{m/s}^{1,75}$  ( $\text{VDV}=0,384\text{m/s}^{1,75}$ ), respectivamente,

referentes ao ponto de leitura 4 (Figura 141), que se encontra localizado no centro do 4º vão, entre a 4ª e 5ª viga, 9º degrau da arquibancada superior.

Nas três situações de carregamento com 100% de ocupação sobre os diferentes setores da arquibancada analisada (situações de carregamento: SC-5, SC-10 e SC-15) foram encontrados valores máximos de aceleração de pico da ordem de  $0,290\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,290\text{m/s}^2$ ) (situação SC-5: 100% de ocupação sobre a arquibancada superior; ver Figura 129),  $0,021\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,021\text{m/s}^2$ ) (situação SC-10: 100% de ocupação sobre o camarote; ver Figura 134) e  $0,151\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,151\text{m/s}^2$ ) (situação SC-15: 100% de ocupação sobre a arquibancada inferior; ver Figura 139).

Com relação à aceleração *rms*, para a situação SC-5 (100% de ocupação sobre a arquibancada superior; ver Figura 129), o valor máximo obtido foi de  $0,158\text{m/s}^2$  ( $a_{rms}=0,158\text{m/s}^2$ ), na situação SC-10 (100% de ocupação sobre o camarote; ver Figura 134) foi de  $0,015\text{m/s}^2$  ( $a_{rms}=0,015\text{m/s}^2$ ) e na situação SC-15 (100% de ocupação sobre a arquibancada inferior; ver Figura 139) foi de  $0,087\text{m/s}^2$  ( $a_{rms}=0,087\text{m/s}^2$ ).

O valor máximo para as acelerações em valores de doses de vibração (VDV), na situação SC-5 (100% de ocupação sobre a arquibancada superior; ver Figura 129) foi de  $0,376\text{m/s}^{1,75}$  ( $\text{VDV}=0,376\text{m/s}^{1,75}$ ), na situação SC-10 (100% de ocupação sobre o camarote; ver Figura 134) foi de  $0,105\text{m/s}^{1,75}$  ( $\text{VDV}=0,105\text{m/s}^{1,75}$ ) e na situação SC-15 (100% de ocupação sobre a arquibancada inferior; ver Figura 139) foi de  $0,287\text{m/s}^{1,75}$  ( $\text{VDV}=0,287\text{m/s}^{1,75}$ ).

Destaca-se que todos os valores máximos encontrados para aceleração de pico, aceleração *rms* e aceleração em valores de doses de vibração (VDV), respectivamente, foram encontrados no ponto de leitura 4, no que tange às situações de carregamento SC-1 a SC-5 e SC-16, no ponto de leitura 8 para as situações de carregamento SC-6 a SC-10 e no ponto de leitura 11 para as situações de carregamento SC-11 a SC-15 (pontos de leitura: ver Figura 141).

Os valores encontrados para as acelerações de pico, *rms* e em valores de doses de vibração (VDV) são pouco expressivos, uma vez que o valor da massa das arquibancadas é muito superior ao valor da massa do carregamento dinâmico humano considerado para as situações de carregamento investigadas (SC-1 a SC-16).

Os valores de aceleração de pico obtidos em todas as dezesseis situações de carregamento estudadas (SC-1 a SC-16), em todos os doze pontos de leitura, encontram-se abaixo da faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida pelo Murray (2016). O mesmo foi verificado para as acelerações *rms* encontradas, onde todos os valores obtidos, nos doze pontos de leitura, não ultrapassam os valores limites aceitáveis estabelecidos pela ISO2631/1 (1997) e SCI (2009). Finalmente, com relação às acelerações em valores de doses de vibração (VDV), os limites aceitáveis estabelecidos por Setareh (2012) e Ellis e Littler (2004) também não foram ultrapassados, nos doze pontos de leitura. Portanto, faz-se necessário ressaltar que os valores encontrados para as acelerações de pico, *rms* e em valores de doses de vibração (VDV), ao longo desta investigação, atendem aos critérios de conforto humano.

Observou-se ainda que, para as situações de carregamento SC-1 a SC-5 (Figuras 125 a 129), que considera ocupação somente sobre a arquibancada superior, os resultados obtidos nos pontos de leitura presentes no camarote (pontos de leitura 7 a 9) e na arquibancada inferior (pontos de leitura 10 a 12) não são significativos, ou seja, não sofrem grande interferência do carregamento atuante sobre a arquibancada superior. Esse mesmo comportamento foi verificado nas situações de carregamento que consideram carregamento somente sobre o camarote (SC-6 a SC-10: ver Figuras 130 a 134), além das situações que possuem ocupação somente sobre a arquibancada inferior (SC-11 a SC-15: ver Figuras 135 a 139). A partir dessa verificação, constata-se que as respostas dinâmicas encontradas nos pontos de leitura que não estão situados nos setores onde o carregamento está atuando não são expressivas.

A resposta estrutural dinâmica do modelo estrutural, no domínio da frequência, indica que os picos onde ocorrem as transferências de energia do sistema mais significativas correspondem, principalmente, aos três harmônicos da excitação dinâmica humana ( $f_1=2,20\text{Hz}$ ;  $f_2=4,40\text{Hz}$  e  $f_3=6,60\text{Hz}$ ). Ressalta-se, também que o efeito da interação dinâmica torcida-arquibancada (modelos biodinâmicos), representativo das ações dinâmicas humanas rítmicas mobilizou transferências de energia do sistema para modos de vibração que não representam os harmônicos da excitação, por exemplo, as frequências naturais de  $2,47\text{Hz}$  e

5,75Hz, que correspondem ao terceiro e ao nono modo de vibração da estrutura, respectivamente.

d) Modelos biodinâmicos versus modelos tradicionais de "força dura"

Uma análise comparativa foi realizada entre os valores das respostas dinâmicas obtidas no presente trabalho, com base na utilização da modelagem biodinâmica para simular a ação dinâmica representativa de pessoas (torcida), e os resultados calculados por dois modelos de carregamentos dinâmicos provenientes de funções matemáticas. O primeiro modelo de carregamento de "força-dura" utilizado foi o modelo desenvolvido por Faisca (2003) e o segundo modelo de carregamento de "força dura" utilizado foi o modelo desenvolvido pelo SCI (2009). Ressalta-se que esses dois modelos levam em consideração a aplicação da força diretamente sobre a estrutura, enquanto que na modelagem biodinâmica o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura é considerado na modelagem, por meio da aplicação dos valores experimentais de aceleração, velocidade e deslocamento aplicados sobre o grau de liberdade da massa do sistema biodinâmico e os valores de força são aplicados sobre a arquibancada.

O valor de aceleração de pico mais elevado obtido nesta investigação quando da utilização da modelagem biodinâmica foi da ordem de  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ) em comparação a aceleração máxima de  $0,46\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,46\text{m/s}^2$ ) calculada mediante o uso do modelo de carregamento proposto por Faisca (2003) e de  $0,77\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,77\text{m/s}^2$ ) utilizando-se o modelo de carregamento proposto pelo SCI (2009). Esses valores foram determinados para a situação de carregamento SC-16 (Figura 140), a qual apresenta taxa de ocupação de 100% em todos os níveis das arquibancadas (arquibancada superior, camarote e arquibancada inferior), associados ao ponto de leitura 4 (Figura 141). Cabe destacar que o valor de aceleração de pico igual a  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ) calculado com base no uso dos modelos biodinâmicos, corresponde a 67% do valor de aceleração máxima obtida, via emprego do modelo de carregamento proposto por Faisca (2003), e 40% do valor de pico obtido a partir do uso do modelo proposto pelo SCI (2009).

Ressalta-se que todos os valores de aceleração de pico nos doze pontos de leitura, nas quatro situações de carregamento (SC-15, SC-10, SC-15 e SC-16), quando se utilizou a modelagem biodinâmica e o modelo de carregamento proposto

por Faisca (2003) encontram-se abaixo ou dentro da faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida por Murray (2016), atendendo assim os critérios de conforto humano. Em contrapartida, os valores de aceleração de pico encontrados no ponto de leitura 4, nas situações de carregamento SC-5 e SC-16, quando se utilizou o modelo proposto pelo SCI (2009), ultrapassam a faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida por Murray (2016), portanto esse valores não atendem os critérios de conforto humano.

Conclui-se, portanto, que a modelagem biodinâmica proposta neste trabalho de pesquisa, apresenta uma clara tendência a fornecer valores de acelerações de pico menos conservativos, tendo em mente o efeito do amortecimento inerente à presença das pessoas sobre as arquibancadas, o que produz níveis menos elevados de transferência de energia para o sistema. Essa conclusão se repete ao longo da investigação para todas as situações de carregamento estudadas (SC-1 a SC-16), em todas as seções estruturais analisadas (doze pontos de leitura), quando comparada aos valores obtidos a partir do emprego dos modelos de carregamento propostos por Faisca (2003) e pelo SCI (2009).

Neste sentido, ressalta-se que a avaliação da resposta estrutural dinâmica das arquibancadas, mediante o emprego de sistemas biodinâmicos representativos das torcidas, com base na consideração do efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura, apresenta uma tendência importante para uma representação mais realista acerca da ação dinâmica humana rítmica, evidentemente, com reflexos benéficos para a avaliação do conforto humano, em função de uma redução consistente dos valores das acelerações de pico (acelerações máximas), tendo em mente a consideração do amortecimento inerente às torcidas; e, ainda, pelo fato de que a modelagem biodinâmica incorpora, naturalmente, as diferenças de fase entre as pessoas, influenciando diretamente sobre os valores da resposta dinâmica do sistema (deslocamentos e acelerações máximas). Verifica-se, ainda, que a consideração das ações dinâmicas humanas através de modelos de carregamento que não incorporam o efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura (FAISCA, 2003; SCI, 2009), fornecem valores de acelerações de pico conservativos, em níveis mais elevados em termos quantitativos, o que pode levar a concepção de projetos estruturais antieconômicos.



### 8.3 Sugestões para trabalhos futuros

a) Realizar testes experimentais sobre modelos estruturais de arquibancadas reais, existentes, considerando-se diversas situações de carregamento, como por exemplo, durante a realização de um jogo de futebol ou mesmo durante a realização de shows musicais;

b) Realizar uma avaliação crítica e detalhada acerca do comportamento das torcidas durante as partidas de futebol, ou mesmo das pessoas durante a realização de shows musicais, de maneira a levar em conta considerações mais realistas acerca da modelagem dos sistemas biodinâmicos;

c) Realizar novos testes experimentais considerando-se diferentes valores para as frequências de carregamento humano (frequências de excitação), através da utilização de valores usuais de frequência de excitação representativos das torcidas de futebol;

d) Desenvolvimento de modelos biodinâmicos com um número mais elevado de graus de liberdade, de forma a abranger um estudo mais extenso e refinado acerca da modelagem numérica das ações dinâmicas humanas (sistemas biodinâmicos);

e) Avaliação da influência do efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura para modelos estruturais com níveis distintos de rigidez (rígidos ou flexíveis), de modo a melhor avaliar, qualitativamente e quantitativamente, a influência deste efeito sobre a resposta dinâmica do sistema estrutural e sobre as avaliações de conforto humano.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, D. E.; RAINER, J. H. Floor vibration. *Canadian Building Digest*, Division of Building Research, NRCC, Ottawa, Canada, pp. 173, 1975.

ALVES, N. K. C. *Cargas Dinâmicas devido a Pessoas em Movimento*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

AN, Q. et al. Dynamic performance characteristics of an innovative Cable Supported Beam Structure–Concrete Slab Composite Floor System under human-induced loads. *Engineering Structures*, v. 117, p. 40–57, 2016.

ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2009.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*, 2014.

BACHMANN, H. et al. *Vibration problems in structures - practical guidelines*. Basel (Switzerland): Birkhäuser, 1995.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. J. *Vibrations in Structures Induced by Man and Machines*. Zürich (Switzerland), IABSE—AIPC—IVBH, 1987.

BOCIAN, M. et al. *Experimental identification of the behaviour of and lateral forces from freely-walking pedestrians on laterally oscillating structures in a virtual reality environment*. *Engineering Structures* 105, p 62–76, 2015.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS 6472: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*, United Kingdom, 1992.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS 6472-1: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings: Vibration sources other than blasting*, United Kingdom, 2008.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS 6841: Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock*, United Kingdom, 1987.

BRITO, V. L; PIMENTEL, R. L. Cases of Collapse of Demountable Grandstands. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 23, n.3, 2009.

BROWNJOHN, J. M. W. Energy dissipation in one-way slabs with human participation. *Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference*, Vol. 1, Nanyang Technological University, Singapore, p. 13–15, 1999.

BROWNJOHN, J.M.W.; MIDDLETON, C.J. Procedures for vibration serviceability assessment of high-frequency floors. *Engineering Structures*, v. 30, iss. 6, p. 1548–1559, jun. 2008.

CAETANO, E.; CUNHA, Á.; MOUTINHO, C. Vandal Loads and Induced Vibrations on a Footbridge. *J. Bridge Eng*, v.16(3), n. June, p.375–382, 2011.

CAMPISTA F. F.; GASPAR C. M. R.; SILVA, J. G. S. DA. Modelling of the human rhythmic actions and human comfort study on the steel-concrete composite buildings. *XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE 2015*. CD-ROM: 1-16, 2015.

CAMPISTA, D. F. *Análise dinâmica e estudo de conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília*. 2015. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CAMPISTA, F. F.; SILVA, J. G. S. DA. Avaliação do Conforto Humano de Pisos de Edificações Submetidos à Ginástica Aeróbica com base na Utilização de Modelos Biodinâmicos. *XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE 2017*, Florianópolis, v. 1, 2017.

CAMPISTA, D. F.; SILVA, J. G. S. DA. Avaliação do Comportamento Estrutural Dinâmico das Arquibancadas do Estádio Nacional De Brasília. *XIII Simpósio de Mecânica Computacional (XIII SIMMEC 2018)*, Vitória, v. 1. p. 1-15, 2018a.

CAMPISTA, D. F.; SILVA, J. G. S. DA. Análise Dinâmica e Avaliação de Conforto Humano das Arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília. *60º Congresso Brasileiro do Congresso (CBC 2018)*, Foz do Iguaçu, v. 1. p. 1-16, 2018b.

CAPPELLINI, A. M. C. *An Innovative Approach To Evaluate People'S Effects on the Dynamic Behaviour*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica, document em língua inglesa) - Department Of Mechanical Engineering, Doctoral Programme In Mechanical Engineering: Politecnico di Milano, Milão, Itália, 2015.

CAPPELLINI, A., MANZONI, S., VANALI, M. AND CIGADA, A. *Evaluation of the dynamic behaviour of steel staircases damped by the presence of people*. *Engineering Structures* 115, p165-178, 2016.

CASTRO MELLO ARQUITETOS. Disponível em: <http://castromello.com.br/br/projeto/estadio-nacional-de-brasilia-2014/>. Acesso em 18 dez. 2014.

CATBAS, N. et al. *Sensing and Monitoring for Stadium Structures: A Review of Recent Advances and a Forward Look*. *Frontiers in Built Environment*, doi: 10.3389/fbuil.2017.00038, 2017.

CHEN, J., ZHANG, M.; LIU, W. Vibration serviceability performance of an externally prestressed concrete floor during daily use and under controlled human activities. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 04015007, 2015.

CHEN, J.; ZHANG, M.; LIU, W. Vibration Serviceability Performance of an Externally Prestressed Concrete Floor during Daily Use and under Controlled Human Activities. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v.30, n.2, p.4015007, 2015.

CHOPRA, A. K. *Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 3rd ed., Pearson Education, Inc., New Jersey, 2007.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, 634 p., 1993.

COMER, A. J.; BLAKEBOROUGH, A.; WILLIAMS, M. S. Rhythmic crowd bobbing on a grandstand simulator. *Journal of Sound and Vibration*, v. 332, n. 2, p. 442–454, 2013.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. *CEB-FIP Model Code 1990*. London, Thomas Telford, 1993.

COSTA-NEVES, L.F. et al. Multi-storey, multi-bay buildings with composite steel-deck floors under human-induced loads: the human comfort issue. *Journal of constructional steel research*, v.136, p. 34–46, 2014.

CZWIKLA, B.; KASPERSKI, M. Damping Induced by Bobbing or Jumping Persons. *X International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN 2017*, v.199, p. 2820–2825, 2017.

DA SILVA, W. M. *Análise Dinâmica em Estruturas de Arquibancadas Temporárias*. Projeto Final da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, 2011.

DIANATI, M.; SONG, I.; TREIBER, M. *An introduction to genetic algorithms and evolution strategies*. Technical report, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2002.

DOUGILL, J. W. et al. Human structure interaction during rhythmic bobbing. *The Structural Engineer*, n. 22, p. 32–39, 2006.

EBRAHIMPOUR, A.; SACK, R. L. Modeling dynamic occupant loads. *Journal of Structural Engineering*, n. 115, p. 1476–1496, 1989.

EBRAHIMPOUR, A. et al. Measuring dynamic occupant loads by microcomputer. *ASCE Ninth Conference on Electronic Computation*. Anais, 1986.

ELLIS, B. R.; JI, T. Loads generated by jumping crowds: Numerical modelling. *Structural Engineer*, v. 82, n. 17, p. 35–40, 2004a.

ELLIS, B. R.; JI, T. The response of structures to dynamic crowd loads. *BRE Digest 426*, 2004b.

ELLIS, B.R.; JI, T. Floor vibration induced by dance-type loads: verification. *The Structural Engineer*, v. 3, p. 45–50, 1994.

ERLINA, R.; PRIYOSULISTYO; SAPUTRA, A. Vibration Serviceability of Grha Sabha Pramana Auditorium under Human Induced Excitation. *Procedia Engineering*, v.171, p. 1157–1164, 2017.

EUROPEAN COMITEE FOR STANDARDIZATION. *EN 1991-1-1:2002, Eurocode 1: Actions on structures. General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings*, 2002.

FAISCA, R. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE/Engenharia Civil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

FALATI, S. *The contribution of non-structural components to the overall dynamic behaviour of concrete floor slabs*. University of Oxford. Oxford, 1999.

FERRIS, D. P. Louie, M. Farley, C. T. *Running in the real world: adjusting leg*, 1998.

GASPAR, C. M. R.; SILVA, J. G. S. DA. Influence of the Human Rhythmic Activities Modelling on the Composite Floors Dynamic Response. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*, v. 2, n. 1, p. 429–437, 2015.

GASPAR, C.M.R. *Avaliação do efeito da interação humana sobre pisos de edificações submetidos a atividades humanas rítmicas*. Tese de Doutorado - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

GINTY, D.; DENVENT, J. M.; JI, T. The frequency range and distribution of dance type loads. *The Structural Engineer*, v. 79, n. 6, p.27-31, 2001.

HAN, H.; ZHOU, D.; JI, T. *Mechanical parameters of standing body and applications in human-structure interaction*. Int. J. Appl. Mech. 9(2), 2017.

HE, W. et al. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Standing People on Dynamic Properties of a Beam-Like Bridge. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2017, 14 p., 2017.

HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.

IBRAHIM, Z. *The Effects of Crowds on Dynamic Characteristics of Stadia Structures*. The University of Sheffield, 2006.

INFRAESTRUTURA URBANA. Disponível em:  
<http://www.infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/24/estadio-manegarrincha-nova-arena-de-brasilia-incorpora-linhas-277869-1.aspx>. Acesso em 18 dez. 2014.

INGÓLFSSON, E. T.; GEORGAKIS, C. T. A stochastic load model for pedestrian induced lateral forces on footbridges. *Engineering Structures*, v. 33, n. 12, p 3454–3470, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements*, Switzerland, 1985.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements*, Switzerland, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*, Switzerland, 2007.

ISTRUCTE/DCLG/DCMS JOINT WORKING GROUP. *Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action: Recommendations for management, design and assessment*. London Institution of Structural Engineers, 2008.

JI, T.; ELLIS, B. R. Human-Structure Interaction in Vertical Vibrations. *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings*, v.122, n.1, p.1–9, 1997.

JI, T.; ZHOU, D.; ZHANG, Q. Models of a Standing Human Body in Structural Vibration. *Structures and Buildings*, v. 166, p. 367–378, 2013.



JONES, C. A.; REYNOLDS, P.; PAVIC, A. Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review. *Journal of Sound and Vibration*, v. 330, n. 8, p. 1531–1566, 2011.

JULIANI, M.A.C. et al. 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.

JULIANI, M.A.C. et al. Avaliação do Comportamento Dinâmico Estrutural das Arquibancadas do Estádio Palestra Itália. *45º Congresso Brasileiro do Concreto*, 2003.

KASPERSKI, M.; AGU, E. Prediction of crowd-induced vibrations via simulation. *23rd International Modal Analysis Conference (IMAC XXIII)*. Anais...2005.

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.

LITTLER, J. D. Measured phase shifts in the dynamic response of a large permanent cantilever grandstand to human loading. *Structural Dynamics: EURODYN 2002*. Munich, Germany: Taylor & Francis, 2002.

LITTLER, J. D. Frequencies of synchronized human loading for jumping and stamping. *The Structural Engineer*, v.82, n. 6, p. 27 – 35, 2003.

MACA, J.; ROKOS, O. Modelling of Synchronized Jumping Crowds on Grandstands. *Structural and Physical Aspects of Construction Engineering*, v.190, p.645-652, 2017.

MARTÍNEZ, J. F. et al. Jumping load models applied on a gymnasium floor. *Engineering Structures*, v. 125, p. 26–38, 2016.

MATLAB. Versão R2017a. MathWorks, 2017.

MATSUMOTO, Y.; GRIFFIN, M. J. Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, v. 260, n. 3, p. 431–451, 2003.

MCDONALD, M. G. *Experimental Characterization of Jumping and Bobbing Actions for Individuals and Small Groups*. Tese de Doutorado (document em língua inglesa) - School of Engineering, University of Warwick, Warwick, Reino Unido, 2015.

MEGHDARI, A.; ARYANPOUR, M. Dynamic modeling and analysis of the human jumping Process. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, v. 37, p. 97–115, 2003.

MENDES, P.; OLIVEIRA, S. *Análise dinâmica de estruturas: utilização integrada de modelos de identificação modal e modelos de elementos finitos*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2008.

MORELAND, R. The weight of a crowd. *Engineering*, v. 79, p. 551, 1905.

MURRAY, T. M. et al. *Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity: AISC DG11 Second Edition*. Chicago, USA, 2016.

MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E. *Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity*. 2nd printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 2003.

NHLEKO, S.; ZINGONI, A.; MOYO, P. A variable mass model for describing load impulses due to periodic jumping. *Engineering Structures*, v. 30, p. 1760–1769, 2008.

NIGG, B. M.; LIU, W. The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running. *Journal of Biomechanics*, v. 32, p. 849–856, 1999.

NÓBREGA, P. G. B. *Análise Dinâmica de Estruturas de Concreto: Estudo Experimental e Numérico das Condições de Contorno de Estruturas Pré-moldadas*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

NRCC, *User's Guide: NBC (NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA)*, Structural Commentaries, National Research Council of Canada, Ottawa, 2010.

OHLSSON, S. V. *Floor vibrations and human discomfort*. Ph.D. thesis, Division of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1982.

OLIVEIRA, T. J. C.; BRITO, V. L.; PIMENTEL, R. L. Influence of seated spectators on the transverse modal properties of temporary grandstands. *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics*, Porto, Portugal, 2014.

PACHECO, M. A. C.; VELLASCO, M. M. B. R.; LOPES, C. H. *Descoberta de Conhecimento e Mineração de Dados*, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 1999.

PARKHOUSE, J. G.; EWINS, D. J.. Vertical dynamic loading produced by people moving to a beat. *ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Belgium. Katholieke Universiteit Leuven, p. 821–836, 2004.

PARKHOUSE, J. G.; EWINS, D. J. Crowd-induced rhythmic loading. *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, v. 159, p. 247–259, 2006.

PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Experimental verification of novel 3DOF model for grandstand crowd-structure interaction. *26<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC XXVI)*, v. 6399, 2008.

PLACHY, T.; POLAK, M.; VERNER, M. An Experimental Study Focused on Spectators' Behavior and Induced Vibrations of a Reinforced Concrete Grandstand

on a Football Stadium. *X International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2017*, v.199, p. 2871-2876, 2017.

QIN, J. W.; YANG, Q. S.; YANG, N. Modal parameters of human body-structure static interaction systems. *Journal of Vibration and Shock*, v. 31, n. 15, p. 150–157, 2012.

QIN, J. W. et al. Pedestrian–bridge dynamic interaction, including human participation,” *Journal of Sound and Vibration* 332(4), p1107–1124, 2013.

RACIC, V.; CHEN, J. Data-driven generator of stochastic dynamic loading due to people bouncing, *Computers and Structures*, v.158, p. 240–250, 2015.

RACIC, V.; PAVIC, A. Stochastic approach to modelling of near - periodic jumping loads. *Mech. Syst. Sig. Process.* v. 24, p. 3037–3059, doi:10.1016/j.ymsp.2010.05.019, 2010a.

RACIC, V.; PAVIC, A. Mathematical model to generate near-periodic human jumping force signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 24, n. 1, p. 138–152, 2010b.

RACIC, V.; PAVIC, A.; BROWNJOHN, J. M. W. Modern facilities for experimental measurement of dynamic loads induced by humans: A literature review. *Shock and Vibration*, v. 20, n. 1, p. 53–67, 2013.

REYNOLDS, P.; PAVIC, A. Vibration Performance of a Grandstand During an International Football Match. *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 20, n. 3, p. 202–212, 2006.

RODRIGUES, J. F. S.; ALMEIDA, P. A. O. Ações de Torcidas em Estádios de Futebol. *V Simpósio EPUSP Sobre Estruturas de Concreto Armado*, São Paulo, 2003.

SACHSE, R. *The influences of human occupants on the dynamic properties of slender structures*. Tese (Doutorado em Engenharia, document em língua inglesa) - Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, Sheffield, Reino Unido, 2002.

SACHSE, R., PAVIC, A., REYNOLDS, P. Human-Structure Dynamic Interaction in Civil Engineering Dynamics: A Literature Review. *The Shock and Vibration Digest*, v. 35, n.1, p. 3–18, 2003.

SACHSE, R.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Parametric study of modal properties of damped two-degree-of-freedom crowd-structure dynamic systems. *Journal of Sound and Vibration*, v. 274, n. 3–5, p. 461–480, 2004.

SALYARDS, K. A.; HUA, Y. Assessment of dynamic properties of a crowd model for human–structure interaction modeling. *Engineering Structures*, v. 89, p. 103–110, 2015.

SALYARDS, K. A.; FIRMAN III, R. J. Human-Structure Interaction: Effects of Crowd Characteristics. *Civil Engineering Topics*, v, 4, Springer, 2011.

SALYARDS, K. A.; NOSS, N. C. Experimental evaluation of the influence of human-structure interaction for vibration serviceability. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 28, p. 458-465, 2014.

SALYARDS, K.; HANAGAN, L. M. Analysis of Coordinated Crowd Vibration Levels in a Stadium Structure. *Proceedings of the 25th International Modal Analysis Conference*, Orlando, 2007.

SETAREH, M. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, v. 165, n. 5, p. 219–231, 2012.

SHAHABPOOR, E. et al. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures, *J. Sound Vib*, 2017.

SHAHABPOOR, E.; PAVIC, A.; RACIC, V. Interaction between Walking Humans and Structures in Vertical Direction: A Literature Review. *Shock and Vibration*, v. 2016, p. 12–17, 2016.

SILVA, C. A. A. S. *Análise de Vibrações em Elementos Pré-Fabricados de Bancadas de Estádios*. Dissertação de Mestrado e em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2012.

SILVA, F. T. DA; BRITO, H. M. B. F.; PIMENTEL, R. L. Modeling of crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 40, n. July, p. 1196–1204, 2013.

SIM, J. et al. Statistical model of crowd jumping loads. *ASCE Journal of Structural Engineering*, v. 134, n. 12, p. 1852–1861, 2008.

SIM, J. H.; BLAKEBOROUGH, A.; WILLIAMS, M. S. Dynamic loads due to rhythmic jumping and bobbing. *Schueller, C. S. G. I. (ed.) Structural Dynamics: EUROLYN 2005*, France, 2005.

SIM, J. *Human-structure interaction in cantilever grandstands*. Tese (Doutorado em Engenharia, documento em língua inglesa) – University of Oxford, Oxford, Reino Unido, 2006.

SMITH, A. L.; HICKS, S. J.; DEVINE, P. J. Design of Floors for Vibration: A New Approach (Revised Edition). *The Steel Construction Institute (SCI) Publication P354*, Ascot, 2009.

STENPNIEWSKI, L.; HAAG, B. *Baudynamik – Praxis – Mit Zahlreichen Anwendungsbispielen*, Alemanha, 2010.

TATARA, T.; PTASZNIK, B. Vibrations of sports stadium grandstand structure due to crowd-jumping loads. p. 2674–2689. 10.7712/120115.3567.851, 2015.

TAKABATAKE, H. Dynamic analysis of rectangular plates with stepped thickness subjected to moving loads including additional mass. *Journal of Sound and Vibration* 213, v. 5, p. 829–842, 1998.

TILDEN, C. J. Kinetic effects of crowds. *Proceedings ASCE* 39 (3). Anais, 1913.

TOSO, M. A. et al. Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian-structure interaction in walking situations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.72–73, p. 590–606, 2016.

TRIOLA, M. F. Elementary Statistics. *Addison Wesley, 10th edition*, 868 p., 2007.

TUAN, C.; SAUL, W. Loads due to spectator movements. *Journal of Structural Engineering*, v. 111, p. 418-434, 1985.

VAN NIMMEN, K. *Numerical and experimental study of human-induced vibrations of footbridges*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, KU Leuven, 2015.

VASILATOU, V.; HARRISON, R.; NIKITAS, N. Development of a human-structure dynamic interaction model for human sway for use in permanent grandstand design. *X International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2017*, v.199, p. 2895-2900, 2017.

YAO, S. et al. Experimental study of human-induced dynamic forces due to jumping on a perceptibly moving structure. *Journal of Sound and Vibration*, v. 296, p. 150–165, 2006.

YAO, S., et al. Forces generated when bouncing or jumping on a flexible structure. *ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering*. Katholieke Universiteit Leuven, 2002.

ZHANG, M.; GEORGAKIS, C. T.; CHEN, J. Biomechanically excited SMD model of a walking pedestrian. *Journal of Bridge Engineering*, v. 21, n. 8, 2016.

ZHOU, D. et al. Comparison of two models for human-structure interaction. *Applied Mathematical Modelling*, v. 40, n. 5–6, p. 3738–3748, 2016.

ZHOU, X. et al. Vibration serviceability of pre-stressed concrete floor system under human activity. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 2479, p. 1–11, 2016.



**APÊNDICE A** – Valores das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos da modelagem biodinâmica proposta das pessoas 1 a 100

Tabela 55 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 1 a 25

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
1	92,70	820,94	42812,81
2	81,95	657,02	37521,26
3	67,80	547,48	34311,23
4	103,20	731,59	56476,16
5	65,50	515,59	35513,46
6	59,40	817,83	33525,97
7	82,65	874,99	43144,89
8	51,55	752,09	27494,99
9	68,00	530,29	37479,29
10	74,90	706,37	44151,98
11	74,90	467,48	34369,59
12	57,85	542,71	30262,11
13	87,55	778,75	41178,54
14	50,20	354,52	28591,69
15	59,70	399,20	43445,33
16	81,95	958,58	43467,55
17	91,85	1255,70	56394,76
18	69,70	645,85	38085,19
19	88,55	636,79	40037,26
20	64,80	768,36	37653,04
21	68,65	678,62	43094,19
22	80,65	445,92	34659,33
23	60,30	446,88	31366,35
24	86,25	845,05	28816,87
25	78,80	442,65	41174,06

Tabela 56 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 26 a 50

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
26	61,30	1156,33	29887,77
27	67,80	1212,11	22128,31
28	75,85	1284,14	32632,96
29	90,65	1512,29	32072,02
30	92,00	1464,23	41660,01
31	91,40	1730,64	42914,65
32	94,25	1246,80	39701,43
33	59,35	367,01	39229,12
34	82,00	406,37	42137,58
35	99,35	596,52	50889,73
36	99,35	1012,24	48133,92
37	78,25	657,11	29064,73
38	53,45	352,84	28286,45
39	75,15	946,86	43118,68
40	60,25	1064,39	30290,08
41	90,45	1094,51	31957,15
42	83,35	1240,87	15783,92
43	100,15	1718,83	41756,58
44	65,35	660,07	20201,83
45	71,30	1173,13	17268,99
46	75,15	463,1	25869,21
47	86,40	496,17	29236,24
48	53,00	390,78	16498,29
49	60,70	316,01	19402,81
50	92,30	815,02	43912,03

Tabela 57 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 51 a 75

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
51	63,15	1546,04	17063,87
52	70,85	1164,04	12883,57
53	51,10	844,51	19514,83
54	83,05	670,30	35368,71
55	81,85	539,08	51342,01
56	62,50	416,46	28996,23
57	52,85	945,48	42091,11
58	77,30	877,47	38508,47
59	78,10	972,14	31699,33
60	65,90	1152,13	46219,16
61	88,65	714,97	12282,21
62	73,75	280,31	49104,23
63	58,50	1560,61	34209,91
64	77,60	985,78	50568,27
65	73,35	1540,01	44864,39
66	64,25	234,14	4999,01
67	53,05	1427,18	21462,83
68	67,80	530,52	33254,39
69	89,45	1138,96	54287,96
70	72,20	249,51	4930,01
71	61,05	279,49	54772,81
72	88,15	926,86	33114,21
73	76,15	883,32	32963,77
74	87,05	1032,15	35814,57
75	67,45	1570,95	42790,71

Tabela 58 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 76 a 100

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
76	63,50	742,15	32783,35
77	102,50	700,54	59164,25
78	69,15	593,02	18331,15
79	68,75	1134,25	30327,58
80	91,80	1321,27	39523,98
81	73,80	1024,21	25877,86
82	70,70	707,01	55073,06
83	77,80	524,36	42411,68
84	69,90	1030,22	25877,81
85	69,90	511,72	14852,67
86	67,35	813,12	20269,71
87	68,90	879,08	16227,11
88	63,10	848,69	30881,29
89	56,10	383,22	26427,21
90	61,95	667,74	43541,28
91	65,50	555,68	38547,25
92	54,30	464,56	27734,73
93	72,60	1613,41	43237,52
94	91,95	1389,39	33130,67
95	97,50	969,44	34615,95
96	69,90	1424,19	31265,37
97	84,25	317,67	34851,91
98	56,40	589,41	39755,25
99	57,60	1019,22	42314,31
100	81,00	1806,75	29018,39

**APÊNDICE B** – Valores da correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 1 a 100

Tabela 59 - Correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 1 a 25

Pessoa	Coeficiente de Pearson(r)	
	$F_{d1} \times F_d$ (domínio da frequência)	$F_{d1} \times F_d$ (domínio do tempo)
1	0,98	0,89
2	0,97	0,90
3	0,99	0,93
4	0,98	0,94
5	0,97	0,92
6	0,95	0,87
7	0,96	0,87
8	0,98	0,88
9	0,98	0,94
10	0,98	0,95
11	0,99	0,94
12	0,98	0,92
13	0,98	0,92
14	0,98	0,93
15	0,97	0,95
16	0,97	0,90
17	0,97	0,92
18	0,98	0,93
19	0,99	0,94
20	0,97	0,91
21	0,98	0,95
22	0,96	0,87
23	0,95	0,87
24	0,98	0,72
25	0,92	0,96

Tabela 60 - Correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 26 a 50

Pessoa	Coeficiente de Pearson	
	$F_{d1} \times F_d$ (domínio da frequência)	$F_{d1} \times F_d$ (domínio do tempo)
26	0,96	0,78
27	0,98	0,70
28	0,99	0,83
29	0,97	0,70
30	0,98	0,75
31	0,98	0,73
32	0,97	0,72
33	0,98	0,95
34	0,96	0,95
35	0,97	0,89
36	0,97	0,90
37	0,97	0,81
38	0,98	0,92
39	0,94	0,87
40	0,96	0,83
41	0,96	0,76
42	0,99	0,71
43	0,97	0,79
44	0,96	0,84
45	0,98	0,72
46	0,98	0,94
47	0,98	0,93
48	0,99	0,93
49	0,99	0,95
50	0,98	0,89

Tabela 61 - Correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 51 a 75

Pessoa	Coeficiente de Pearson	
	$F_{d1} \times F_d$ (domínio da frequência)	$F_{d1} \times F_d$ (domínio do tempo)
51	0,97	0,71
52	0,96	0,72
53	0,97	0,74
54	0,96	0,92
55	0,97	0,94
56	0,94	0,91
57	0,95	0,89
58	0,98	0,87
59	0,96	0,85
60	0,97	0,70
61	0,94	0,72
62	0,97	0,96
63	0,94	0,80
64	0,98	0,93
65	0,98	0,85
66	0,97	0,96
67	0,98	0,71
68	0,96	0,93
69	0,98	0,93
70	0,99	0,98
71	0,94	0,93
72	0,98	0,71
73	0,96	0,70
74	0,99	0,71
75	0,96	0,82

Tabela 62 - Correlação de Pearson entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 76 a 100

Pessoa	Coeficiente de Pearson	
	$F_{d1} \times F_d$ (domínio da frequência)	$F_{d1} \times F_d$ (domínio do tempo)
76	0,94	0,89
77	0,97	0,95
78	0,98	0,71
79	0,97	0,75
80	0,98	0,84
81	0,95	0,79
82	0,97	0,94
83	0,99	0,96
84	0,96	0,81
85	0,98	0,83
86	0,96	0,78
87	0,98	0,73
88	0,97	0,77
89	0,97	0,94
90	0,94	0,90
91	0,95	0,91
92	0,97	0,93
93	0,97	0,79
94	0,97	0,77
95	0,96	0,80
96	0,94	0,80
97	0,97	0,96
98	0,95	0,93
99	0,95	0,89
100	0,97	0,71



## APÊNDICE C – Geometria da estrutura

Tabela 63 - Dimensões das lajes

Pavimento	Espessura das lajes
3º subsolo	12 cm
2º subsolo	Variam de 12 a 14 cm
1º subsolo	Variam de 14 a 18 cm
Térreo	Variam de 12 a 18 cm
1º pavimento	Variam de 12 a 18 cm
2º pavimento	Variam de 09 a 18 cm

Tabela 64 - Dimensões dos pilares: 1º e 2º linha

Pavimento	1º linha de pilares		2º linha de pilares	
	Pilares extremos	Pilares intermediários	Pilares extremos	Pilares intermediários
3º subsolo	40x300 cm	60x300 cm		
2º subsolo	40x300 cm	60x300 cm	40x180 cm	60x180 cm
1º subsolo	40x300 cm	60x300 cm	40x240 cm	60x240 cm
Térreo	40x300 cm	60x300 cm	40x240 cm	60x240 cm
1º pavimento	40x300 cm	60x300 cm	40x240 cm	60x240 cm
2º pavimento	40x300 cm	60x300 cm	40x240 cm	60x240 cm

Tabela 65 - Dimensões dos pilares: 3º e 4º linha

Pavimento	3º linha de pilares		4º linha de pilares	
	Pilares extremos	Pilares intermediários	Pilares extremos	Pilares intermediários
3º subsolo				
2º subsolo	40x180 cm	60x180 cm		
1º subsolo	40x180 cm	60x180 cm	40x80 cm	60x80 cm
Térreo	40x180 cm	60x180 cm		
1º pavimento				
2º pavimento				

Tabela 66 - Dimensões das vigas transversais: até 1º e 2º linha de pilares

Pavimento	Até 1º linha de pilares		Até 2º linha de pilares	
	Pilares extremos	Pilares intermediários	Pilares extremos	Pilares intermediários
3º subsolo	20x90 cm	30x90 cm		
2º subsolo	20x90 cm	30x90 cm	20x90 cm	30x90 cm
1º subsolo	40x120 cm	60x120 cm	40x120 cm	60x120 cm
Térreo	40x120 cm	60x120 cm	40x120 cm	60x120 cm
1º pavimento	40x100 cm	60x100 cm	40x120 cm	60x120 cm
2º pavimento	40x120 cm	60x120 cm	40x120 cm	60x120 cm

Tabela 67 - Dimensões das vigas transversais: até 1º e 2º linha de pilares

Pavimento	Até 3º linha de pilares		Até 4º linha de pilares	
	Pilares extremos	Pilares intermediários	Pilares extremos	Pilares intermediários
3º subsolo				
2º subsolo	40x80 cm	60x80 cm		
1º subsolo	40x200 cm	60x200 cm	40x240 cm	60x240 cm
Térreo	40x120 cm	60x120 cm		
1º pavimento	40x134 cm	60x134 cm		
2º pavimento	40x192 cm	60x192 cm		

Tabela 68 - Dimensões das vigas internas

Pavimento	Dimensões				
	3º subsolo	14x90 cm	15x217 cm	30x80 cm	
2º subsolo	14x90 cm	15x217 cm	22x80 cm	30x80 cm	
1º subsolo	20x120 cm	22x80 cm	22x100 cm	30x100 cm	30x120 cm
Térreo	20x120 cm	30x100 cm	30x120 cm		
1º pavimento	20x120 cm	22x134 cm	30x100 cm	30x120 cm	30x134 cm
2º pavimento	20x80 cm	20x120 cm	30x100 cm	30x120 cm	

**APÊNDICE D** – Características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos consideradas para as situações de carregamento SC-1 a SC-16

Tabela 69 - Características dinâmicas das pessoas 1 a 25: SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
1	92,70	820,94	42812,81
2	81,95	657,02	37521,26
3	67,80	547,48	34311,23
4	103,20	731,59	56476,16
5	65,50	515,59	35513,46
6	59,40	817,83	33525,97
7	82,65	874,99	43144,89
8	51,55	752,09	27494,99
9	68,00	530,29	37479,29
10	74,90	706,37	44151,98
11	74,90	467,48	34369,59
12	57,85	542,71	30262,11
13	87,55	778,75	41178,54
14	50,20	354,52	28591,69
15	59,70	399,20	43445,33
16	81,95	958,58	43467,55
17	91,85	1255,70	56394,76
18	69,70	645,85	38085,19
19	88,55	636,79	40037,26
20	64,80	768,36	37653,04
21	68,65	678,62	43094,19
22	80,65	445,92	34659,33
23	60,30	446,88	31366,35
24	86,25	845,05	28816,87
25	78,80	442,65	41174,06

Tabela 70 - Características dinâmicas das pessoas 26 a 50: SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
26	61,30	1156,33	29887,77
27	67,80	1212,11	22128,31
28	75,85	1284,14	32632,96
29	90,65	1512,29	32072,02
30	92,00	1464,23	41660,01
31	91,40	1730,64	42914,65
32	94,25	1246,80	39701,43
33	59,35	367,01	39229,12
34	82,00	406,37	42137,58
35	99,35	596,52	50889,73
36	99,35	1012,24	48133,92
37	78,25	657,11	29064,73
38	53,45	352,84	28286,45
39	75,15	946,86	43118,68
40	60,25	1064,39	30290,08
41	90,45	1094,51	31957,15
42	83,35	1240,87	15783,92
43	100,15	1718,83	41756,58
44	65,35	660,07	20201,83
45	71,30	1173,13	17268,99
46	75,15	463,1	25869,21
47	86,40	496,17	29236,24
48	53,00	390,78	16498,29
49	60,70	316,01	19402,81
50	92,30	815,02	43912,03

Tabela 71 - Características dinâmicas das pessoas 51 a 75: SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
51	63,15	1546,04	17063,87
52	70,85	1164,04	12883,57
53	51,10	844,51	19514,83
54	83,05	670,30	35368,71
55	81,85	539,08	51342,01
56	62,50	416,46	28996,23
57	52,85	945,48	42091,11
58	77,30	877,47	38508,47
59	78,10	972,14	31699,33
60	65,90	1152,13	46219,16
61	88,65	714,97	12282,21
62	73,75	280,31	49104,23
63	58,50	1560,61	34209,91
64	77,60	985,78	50568,27
65	73,35	1540,01	44864,39
66	64,25	234,14	4999,01
67	53,05	1427,18	21462,83
68	67,80	530,52	33254,39
69	89,45	1138,96	54287,96
70	72,20	249,51	4930,01
71	61,05	279,49	54772,81
72	88,15	926,86	33114,21
73	76,15	883,32	32963,77
74	87,05	1032,15	35814,57
75	67,45	1570,95	42790,71

Tabela 72 - Características dinâmicas das pessoas 76 a 100: SC-1 a SC-5 e SC-8 a SC-16

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
76	63,50	742,15	32783,35
77	102,50	700,54	59164,25
78	69,15	593,02	18331,15
79	68,75	1134,25	30327,58
80	91,80	1321,27	39523,98
81	73,80	1024,21	25877,86
82	70,70	707,01	55073,06
83	77,80	524,36	42411,68
84	69,90	1030,22	25877,81
85	69,90	511,72	14852,67
86	67,35	813,12	20269,71
87	68,90	879,08	16227,11
88	63,10	848,69	30881,29
89	56,10	383,22	26427,21
90	61,95	667,74	43541,28
91	65,50	555,68	38547,25
92	54,30	464,56	27734,73
93	72,60	1613,41	43237,52
94	91,95	1389,39	33130,67
95	97,50	969,44	34615,95
96	69,90	1424,19	31265,37
97	84,25	317,67	34851,91
98	56,40	589,41	39755,25
99	57,60	1019,22	42314,31
100	81,00	1806,75	29018,39

Tabela 73 - Características dinâmicas das pessoas 1 a 25: SC-6

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
1	92,70	820,94	42812,81
2	81,95	657,02	37521,26
3	67,80	547,48	34311,23
4	103,20	731,59	56476,16
5	65,50	515,59	35513,46
6	59,40	817,83	33525,97
7	82,65	874,99	43144,89
8	51,55	752,09	27494,99
9	68,00	530,29	37479,29
10	74,90	706,37	44151,98
11	74,90	467,48	34369,59
12	57,85	542,71	30262,11
13	87,55	778,75	41178,54
14	50,20	354,52	28591,69
15	59,70	399,20	43445,33
16	81,95	958,58	43467,55
17	91,85	1255,70	56394,76
18	69,70	645,85	38085,19
19	88,55	636,79	40037,26
20	64,80	768,36	37653,04
21	68,65	678,62	43094,19
22	80,65	445,92	34659,33
23	60,30	446,88	31366,35
24	86,25	845,05	28816,87
25	78,80	442,65	41174,06

Tabela 74 - Características dinâmicas das pessoas 26 a 43: SC-6

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
26	61,30	1156,33	29887,77
27	67,80	1212,11	22128,31
28	75,85	1284,14	32632,96
29	90,65	1512,29	32072,02
30	92,00	1464,23	41660,01
31	91,40	1730,64	42914,65
32	94,25	1246,80	39701,43
33	59,35	367,01	39229,12
34	82,00	406,37	42137,58
35	99,35	596,52	50889,73
36	99,35	1012,24	48133,92
37	78,25	657,11	29064,73
38	53,45	352,84	28286,45
39	75,15	946,86	43118,68
40	60,25	1064,39	30290,08
41	90,45	1094,51	31957,15
42	83,35	1240,87	15783,92
43	100,15	1718,83	41756,58

Tabela 75 - Características dinâmicas das pessoas 1 a 7: SC-7

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
1	92,70	820,94	42812,81
2	81,95	657,02	37521,26
3	67,80	547,48	34311,23
4	103,20	731,59	56476,16
5	65,50	515,59	35513,46
6	59,40	817,83	33525,97
7	82,65	874,99	43144,89



Tabela 76 - Características dinâmicas das pessoas 8 a 35: SC-7

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
8	51,55	752,09	27494,99
9	68,00	530,29	37479,29
10	74,90	706,37	44151,98
11	74,90	467,48	34369,59
12	57,85	542,71	30262,11
13	87,55	778,75	41178,54
14	50,20	354,52	28591,69
15	59,70	399,20	43445,33
16	81,95	958,58	43467,55
17	91,85	1255,70	56394,76
18	69,70	645,85	38085,19
19	88,55	636,79	40037,26
20	64,80	768,36	37653,04
21	68,65	678,62	43094,19
22	80,65	445,92	34659,33
23	60,30	446,88	31366,35
24	86,25	845,05	28816,87
25	78,80	442,65	41174,06
26	61,30	1156,33	29887,77
27	67,80	1212,11	22128,31
28	75,85	1284,14	32632,96
29	90,65	1512,29	32072,02
30	92,00	1464,23	41660,01
31	91,40	1730,64	42914,65
32	94,25	1246,80	39701,43
33	59,35	367,01	39229,12
34	82,00	406,37	42137,58
35	99,35	596,52	50889,73

Tabela 77 - Características dinâmicas das pessoas 36 a 63: SC-7

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
36	99,35	1012,24	48133,92
37	78,25	657,11	29064,73
38	53,45	352,84	28286,45
39	75,15	946,86	43118,68
40	60,25	1064,39	30290,08
41	90,45	1094,51	31957,15
42	83,35	1240,87	15783,92
43	100,15	1718,83	41756,58
44	65,35	660,07	20201,83
45	71,30	1173,13	17268,99
46	75,15	463,1	25869,21
47	86,40	496,17	29236,24
48	53,00	390,78	16498,29
49	60,70	316,01	19402,81
50	92,30	815,02	43912,03
51	63,15	1546,04	17063,87
52	70,85	1164,04	12883,57
53	51,10	844,51	19514,83
54	83,05	670,30	35368,71
55	81,85	539,08	51342,01
56	62,50	416,46	28996,23
57	52,85	945,48	42091,11
58	77,30	877,47	38508,47
59	78,10	972,14	31699,33
60	65,90	1152,13	46219,16
61	88,65	714,97	12282,21
62	73,75	280,31	49104,23
63	58,50	1560,61	34209,91

Tabela 78 - Características dinâmicas das pessoas 64 a 86: SC-7

64	77,60	985,78	50568,27
65	73,35	1540,01	44864,39
66	64,25	234,14	4999,01
67	53,05	1427,18	21462,83
68	67,80	530,52	33254,39
69	89,45	1138,96	54287,96
70	72,20	249,51	4930,01
71	61,05	279,49	54772,81
72	88,15	926,86	33114,21
73	76,15	883,32	32963,77
74	87,05	1032,15	35814,57
75	67,45	1570,95	42790,71
76	63,50	742,15	32783,35
77	102,50	700,54	59164,25
78	69,15	593,02	18331,15
79	68,75	1134,25	30327,58
80	91,80	1321,27	39523,98
81	73,80	1024,21	25877,86
82	70,70	707,01	55073,06
83	77,80	524,36	42411,68
84	69,90	1030,22	25877,81
85	69,90	511,72	14852,67
86	67,35	813,12	20269,71