



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Fernanda Fernandes Campista

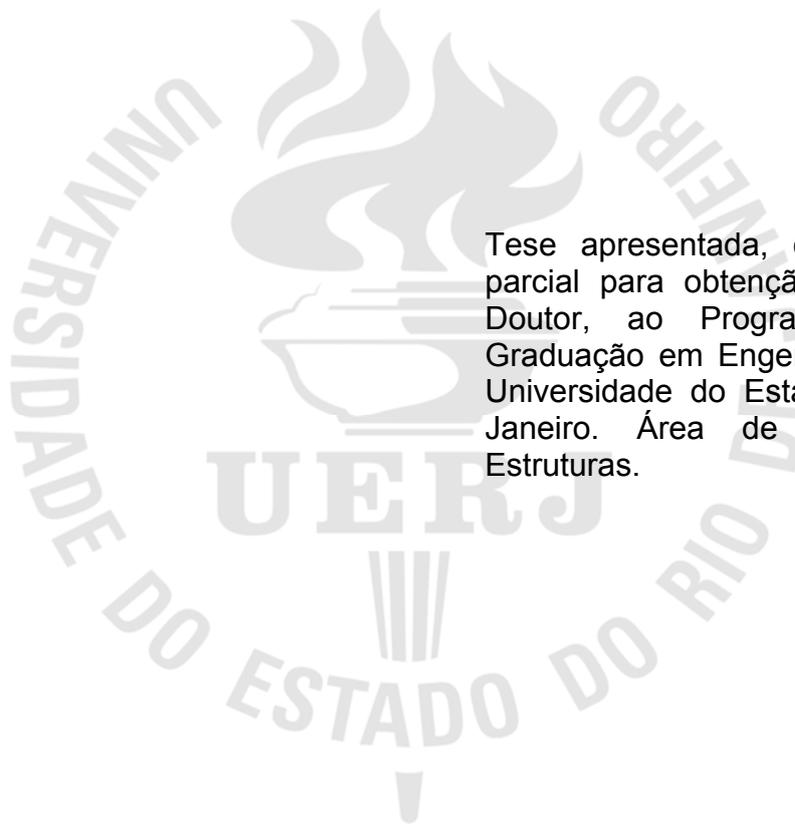
**Modelagem de sistemas biodinâmicos para avaliação do  
comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto)  
de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas**

Rio de Janeiro

2019

Fernanda Fernandes Campista

**Modelagem de sistemas biodinâmicos para avaliação do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas**



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, Fernanda Fernandes.  
Modelagem de sistemas biodinâmicos para avaliação do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas / Fernanda Fernandes Campista. – 2019.  
243f.

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

1. Engenharia civil - Teses. 2. Construção mista - Teses. 3. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 4. Conforto humano - Teses. 5. Edifícios - Teses. 6. 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 624.016:692.52

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

Fernanda Fernandes Campista

**Modelagem de sistemas biodinâmicos para avaliação do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas**

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.

Aprovado em: 14 de junho de 2019.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva (Orientador)  
Faculdade de Engenharia- UERJ

---

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

---

Prof. Dr. Rodrigo Bid Burgos  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. Paulo Batista Gonçalves  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

---

Prof. Dr. Eliane Maria Lopes Carvalho  
Universidade Federal Fluminense - UFF

---

Prof. Dr. Gilvan Lunz Debona  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ

Rio de Janeiro

2019

## DEDICATÓRIA

A Deus e minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

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.

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

Aos amigos de faculdade, que compartilharam toda sua experiência, dificuldades, momentos tristes e alegres durante a graduação. Sem a nossa união não iríamos conseguir chegar tão longe.

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

Para encontrar a si mesmo, pense por si mesmo.

*Sócrates*

## RESUMO

CAMPISTA, Fernanda Fernandes. *Modelagem de sistemas biodinâmicos para avaliação do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas*. 2019. 243f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

O principal objetivo deste trabalho de pesquisa é o de avaliar o comportamento estrutural dinâmico de pisos de edificações, quando submetidos a atividades humanas rítmicas (atividades aeróbicas), com base em testes experimentais e modelagem numérica. O foco desta investigação é o de avaliar os níveis de conforto humano de pisos, simulando as pessoas com base no emprego de sistemas biodinâmicos. Este trabalho de pesquisa considera o efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura, 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 das pessoas. 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). Em seguida, modelos matemáticos tradicionais de carregamento dinâmico (modelos de “força dura”) são considerados na análise dinâmica para efeito de comparação de resultados. O modelo estrutural estudado corresponde a um piso misto (aço-concreto) com dimensões de 40m x 40m e uma área total de 1600m<sup>2</sup>. A estrutura representa um andar interior típico de um edifício comercial utilizado para aulas ginástica aeróbica. O piso misto é apoiado por colunas de aço e submetido a cargas rítmicas de ginástica aeróbica. O sistema é composto por vigas mistas e uma laje de concreto com 100mm de espessura, e a altura das colunas é igual a 4m. A modelagem numérica da estrutura foi realizada a partir do uso do programa computacional ANSYS, via emprego do método dos elementos finitos (MEF). Assim sendo, a resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto) investigado foi avaliada em função dos valores das acelerações máximas, RMS e VDV, com base em critérios de conforto humano atuais. Os resultados encontrados ao longo desta investigação indicam reduções quantitativas significativas referentes aos valores das acelerações de pico, quando os sistemas biodinâmicos são considerados na análise, em comparação com os resultados fornecidos pelos modelos matemáticos de “força dura”.

Palavras-chave: Pisos mistos (aço-concreto); Sistemas biodinâmicos; Dinâmica estrutural; Testes experimentais; Análise de conforto humano; Modelagem numérica.

## ABSTRACT

CAMPISTA, Fernanda Fernandes. *Modelling of biodynamic systems for evaluation of the dynamic structural behaviour of steel concrete composite building floors subjected to human rhythmic activities*. 2019. 243f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

The main objective of this research work is to investigate the dynamic structural response of building floors, when subjected to rhythmic human activities (aerobics), based on experimental tests and numerical modelling. The focus of this investigation is to assess the human comfort of floors, simulating the individuals based on the use of biodynamic systems. This research work considers the effect of the dynamic interaction individuals-structure, based on the use of biodynamic models corresponding to mass-spring-damping systems, with one degree of freedom (SDOF), in order to represent the people's dynamic behaviour. 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). After that, traditional dynamic loading mathematical models ("force only" models) are considered in the dynamic analysis to results comparisons. The analysed structural model is related to a steel-concrete composite floor with dimensions of 40m x 40m and total area of 1600m<sup>2</sup>. The structure represents a typical interior floor of a commercial building used for aerobics. The composite floor is supported by steel columns and is currently submitted to aerobic rhythmic loads. The system is made from composite beams and a 100mm thick concrete slab and the columns height is equal to 4m. The numerical modelling of the structure was performed based on the use of the ANSYS computational program and utilizing the Finite Element Method (FEM) simulations. Thus, the dynamic response of the investigated composite floors was evaluated in terms of RMS of the peak accelerations, RMS and VDV values, based on current human comfort criteria. The results found along this investigation have indicated significant reductions of the peak accelerations values, when the biodynamic systems were considered in comparison with the results provided by the "force only" models.

Keywords: Steel-concrete composite floors; Biodynamic models; Structural dynamics; Experimental tests; Human comfort analysis; Numerical modelling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Atividades Humanas rítmicas.....	32
Figura 2 - Atividades Humanas rítmicas.....	32
Figura 3 - Atividades Humanas rítmicas. Shows (CORREIO DO POVO) .....	33
Figura 4 - Fases do movimento (adaptado de MEGHDARI e ARYANPOUR, 2003). 34	
Figura 5 - Saltos rítmicos (adaptado de MEGHDARI e ARYANPOUR, 2003).....	35
Figura 6 - Saltos rítmicos realizados no jump (PHILLYMAG).....	35
Figura 7 - Saltos rítmicos realizados nos movimentos do jump (LUNGESANDLYCRA).....	36
Figura 8 - Saltos rítmicos realizados no jump (JUMPING-FITNESS).....	36
Figura 9 - Variação das frequências dos saltos (SIM et al.,2015) .....	37
Figura 10 - Modelo da função “semissereno” proposto por Bachmann e Ammann (1987) [Adaptado de Bachmann e Ammann (1987)] .....	40
Figura 11 - Ajuste de funções matemáticas ao sinal experimental (saltos rítmicos) .43	
Figura 12 - CD em função da atividade e número de pessoas (FAISCA, 2003) .....	45
Figura 13 - Frequências características do corpo humano (SOEIRO, 2009) .....	46
Figura 14 - Modelo de corpo humano como massa inerte .....	48
Figura 15 - Sistema massa-mola-amortecedor representando a interação ser humano-estrutura .....	48
Figura 16 - Resposta dinâmica do estádio de Twickenham (ELLIS; JI, 1997) .....	49
Figura 17 - Pessoa em pé sobre o sistema estrutural (BROWNJOHN, 1999) .....	50
Figura 18 - FRFs da estrutura vazia e ocupada (BROWNJOHN, 1999) .....	50
Figura 19 - Resposta dinâmica da plataforma aos saltos de 2 Hz (YAO ET AL, 2002) .....	52
Figura 20 - Resposta da plataforma aos saltos de 2 Hz (YAO ET AL, 2006).....	52
Figura 21 - Pessoa sobre a plataforma instrumentada (RACIC; BROWNJOHN; PAVIC, 2010) .....	53
Figura 22 - Resposta dinâmica da plataforma instrumentada (RACIC; BROWNJOHN; PAVIC, 2010) .....	54
Figura 23 - Estrutura monitorada durante os ensaios (SALYARDS; NOSS, 2014) ...	56
Figura 24 - Ressonância global dos pavimentos (LEE ET ALL, 2014).....	57

Figura 25 - Avaliação das vibrações do piso de concreto protendido (ZHOU et al.,2016b) .....	58
Figura 26 - Piso misto suportado por cabos sob atividades humanas (AN et al.,2016) .....	59
Figura 27 - Estrutura sob atividades rítmicas (ERLINA; PRIYOSULISTYO; SAPUTRA, 2017) .....	59
Figura 28 - Pessoa com pés levantados durante os testes realizados (HE AT AL, 2017) .....	60
Figura 29 - Pessoa com joelhos retos durante os testes realizados (HE AT AL, 2017) .....	60
Figura 30 - Pessoa com joelhos flexionados durante os testes realizados (HE AT AL, 2017) .....	61
Figura 31 - Aceleração medida durante a caminhada numa frequência de 2,20 Hz (JONES et al., 2017) .....	61
Figura 32 - FRF da estrutura ocupada com diferentes números de pessoas.....	62
Figura 33 - Saltos realizados sobre uma plataforma (GASPAR, 2018).....	63
Figura 34 - Direções das vibrações (ISO 2631-1, 1997) .....	69
Figura 35 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração no eixo z (ISO 10137, 2007) .....	72
Figura 36 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração nos eixos x e y (ISO 10137, 2007).....	72
Figura 37 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração em direção combinada nos eixos x, y, z (ISO 10137, 2007) .....	73
Figura 38 - Valores de aceleração de pico recomendados para o conforto humano devido a atividades humanas (AISC, 2016, p. 7) .....	80
Figura 39 - Modelo biodinâmico não amortecido (JI., ELLIS, 1995; FERRIS et al.1999; HOTHAN, 1999 e WILLIANS et al.,1999) .....	86
Figura 40 - Modelos biodinâmicos (MATSUMOTO; GRIFFIN, 2003).....	87
Figura 41 - Modelo de Interação ser humano - estrutura (ELLIS; JI,1997; BROWNJOHN, 1999,2001; ZHENG; BROWNJOHN, 2001;SACHSE ET AL.,2004; ALEXANDER, 2006; ZHOU; JI, 2006; SIM ET AL.,2006; JONES ET AL ,2011).....	88
Figura 42 - Modelo de interação ativa de 1 grau de liberdade (ZHANG; GEORGAKIS; CHEN, 2016) .....	90

Figura 43 - Metodologia de análise utilizada para os testes experimentais .....	93
Figura 44 - Conjunto de equipamentos utilizados para a realização dos ensaios .....	94
Figura 45 - Croqui de posicionamento das células de carga.....	95
Figura 46 - Posicionamento do acelerômetro no centro de gravidade do indivíduo ..	96
Figura 47 - Detalhe do acoplamento do acelerômetro ao indivíduo .....	96
Figura 48 - Sistema de aquisição de dados ADS-2002 conectado ao acelerômetro e células de carga .....	97
Figura 49 - Balança digital.....	97
Figura 50 - Aplicativo metrônomo instalado no celular.....	98
Figura 51 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 55 (m=81,85kg).....	99
Figura 52 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 61 (m=88,65kg).....	100
Figura 53 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 94 (m=91,95kg).....	101
Figura 54 - Caixa do Acelerômetro Dytran .....	103
Figura 55 - Acelerômetro Dytran (transdutor de aceleração capacitivo) .....	103
Figura 56 - Acelerômetro Dytran. Conector fêmea (esq.) / Conector macho do cabo (dir.).....	104
Figura 57 - Célula de carga do modelo CSR-1000.....	105
Figura 58 - Placa de MDF utilizada nos ensaios .....	106
Figura 59 - Vista isométrica do 1 <sup>o</sup> Modo de vibração via programa numérico computacional ANSYS (f=62,3 Hz) .....	107
Figura 60 - Vista superior do 1 <sup>o</sup> Modo de vibração via programa numérico computacional ANSYS (f=62,3 Hz) .....	107
Figura 61 - Frequência fundamental da plataforma via análise experimental (f=62,2Hz) .....	108
Figura 62 - Sistema ADS 2002: vista frontal.....	109
Figura 63 - Sistema de aquisição de dados ADS 2002 acoplado ao computador .....	109
Figura 64 - Processamento dos sinais no software AQDanalysis .....	110
Figura 65 - Força no domínio do Tempo. Pessoa com 50,2 kg.....	111
Figura 66 - Aceleração no domínio do Tempo. Pessoa com 50,2 kg .....	112
Figura 67 - Velocidade no domínio do Tempo. Pessoa com 50,2 kg .....	112
Figura 68 - Deslocamento no domínio do Tempo. Pessoa com 50,2 kg .....	112
Figura 69 - Força no domínio do Tempo. Pessoa com 67,8 kg.....	113

Figura 70 - Aceleração no domínio do Tempo. Pessoa com 67,8 kg .....	113
Figura 71 - Velocidade no domínio do Tempo. Pessoa com 67,8 kg .....	113
Figura 72 - Deslocamento no domínio do Tempo. Pessoa com 67,8 kg .....	114
Figura 73 - Força no domínio do Tempo. Pessoa com 82,65 kg.....	114
Figura 74 - Aceleração no domínio do Tempo. Pessoa com 82,65 kg .....	114
Figura 75- Velocidade no domínio do Tempo. Pessoa com 82,65 kg .....	115
Figura 76 - Deslocamento no domínio do Tempo. Pessoa com 82,65 kg .....	115
Figura 77 - Força no domínio do Tempo. Pessoa com 99,35 kg.....	115
Figura 78 - Aceleração no domínio do Tempo. Pessoa com 99,35 kg .....	116
Figura 79 - Velocidade no domínio do Tempo. Pessoa com 99,35 kg .....	116
Figura 80 - Deslocamento no domínio do Tempo. Pessoa com 99,35 kg .....	116
Figura 81 - Força no domínio da frequência. Pessoa com 50,2 kg .....	118
Figura 82 - Aceleração no domínio da frequência. Pessoa com 50,2 kg .....	118
Figura 83 - Força no domínio da frequência. Pessoa com 67,8 kg .....	118
Figura 84 - Aceleração no domínio da frequência. Pessoa com 67,8 kg .....	119
Figura 85 - Força no domínio da frequência. Pessoa com 82,65 kg .....	119
Figura 86 - Aceleração no domínio da frequência. Pessoa com 82,65 kg .....	119
Figura 87 - Força no domínio da frequência. Pessoa com 99,35 kg .....	120
Figura 88 - Aceleração no domínio da frequência. Pessoa com 99,35 kg .....	120
Figura 89 - Validação do modelo biodinâmico proposto.....	123
Figura 90 - Representação das pessoas modeladas com sistemas biodinâmicos com 1GL .....	124
Figura 91 - Estrutura básica de um algoritmo.....	126
Figura 92 - Parâmetros biodinâmicos otimizados. Pessoa com 51,55 Kg de saltando sob a frequência de 2,20 Hz.....	132
Figura 93 - Parâmetros biodinâmicos otimizados. Pessoa com 64,80 Kg saltando sob a frequência de 2,20 Hz .....	132
Figura 94 - Relação Rigidez x Massa.....	135
Figura 95 - Relação Amortecimento x Rigidez .....	136
Figura 96 - Relação Amortecimento x Massa.....	136
Figura 97 - Modelo estrutural do piso misto (aço-concreto) .....	139
Figura 98 - Vista lateral do piso misto (aço-concreto) .....	140
Figura 99 - Seção genérica dos perfis metálicos.....	140

Figura 100 - Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto) (ANSYS, 2009).....	142
Figura 101 - Vista isométrica do modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto) (ANSYS, 2009).....	142
Figura 102 - Vista superior do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2009).....	143
Figura 103 - Vista do plano XY do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2009).....	143
Figura 104 - Vista do plano ZY do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2009).....	143
Figura 105 - Elemento BEAM44 (ANSYS, 2009) .....	144
Figura 106 - Elemento SHELL63 (ANSYS, 2009).....	144
Figura 107 - Elemento COMBIN7 (ANSYS, 2009) .....	145
Figura 108 - Elemento COMBIN39 (ANSYS, 2009) .....	145
Figura 109 - Elemento COMBIN40 (ANSYS, 2009) .....	146
Figura 110 - 1° e 2° modo de vibração do piso misto investigado .....	150
Figura 111 - 3° e 4° modo de vibração do piso misto investigado .....	150
Figura 112 - 5° e 6° modo de vibração do piso misto investigado .....	150
Figura 113 - Posicionamento das pessoas sobre piso misto investigado .....	152
Figura 114 - Variação da Frequência natural devido à presença das pessoas.....	155
Figura 115 - Variação da taxa de amortecimento devido à presença das pessoas	157
Figura 116 - Situação de carregamento SC-1 .....	161
Figura 117 - Situação de carregamento SC-2 .....	161
Figura 118 - Situação de carregamento SC-3 .....	162
Figura 119 - Situação de carregamento SC-4 .....	162
Figura 120 - Situação de carregamento SC-5 .....	163
Figura 121 - Situação de carregamento SC-6 .....	163
Figura 122 - Situação de carregamento SC-7 .....	164
Figura 123 - Situação de carregamento SC-8 .....	164
Figura 124 - Situação de carregamento SC-9 .....	165
Figura 125 - Situação de carregamento SC-10 .....	165
Figura 126 - Situação de carregamento SC-11 .....	166
Figura 127 - Situação de carregamento SC-12 .....	166

Figura 128 - Situação de carregamento SC-13 .....	167
Figura 129 - Situação de carregamento SC-14 .....	167
Figura 130 - Situação de carregamento SC-15 .....	168
Figura 131 - Posicionamento dos pontos avaliados nas respostas estruturas .....	169
Figura 132 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-1 (16 pessoas; ponto de análise 7).....	170
Figura 133 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-6 (56 pessoas; ponto de análise 7).....	170
Figura 134 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-10 (88 pessoas; ponto de análise 7).....	171
Figura 135 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-15 (128 pessoas; ponto de análise 2).....	171
Figura 136 - Aceleração no domínio do tempo: SC-1 (16 pessoas; ponto de análise 7).....	172
Figura 137 - Aceleração no domínio do tempo: SC-6 (56 pessoas; ponto de análise 7).....	172
Figura 138 - Aceleração no domínio do tempo: SC-10 (88 pessoas; ponto de análise 7).....	173
Figura 139 - Aceleração no domínio do tempo: SC-15 (128 pessoas; ponto de análise 2).....	173
Figura 140 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-1 (16 pessoas; ponto de análise 7).....	175
Figura 141 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-6 (56 pessoas; ponto de análise 7).....	175
Figura 142 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-10 (88 pessoas; ponto de análise 7).....	176
Figura 143 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-15 (128 pessoas; ponto de análise 2).....	176
Figura 144 - Aceleração no domínio da frequência: SC-1 (16 pessoas; ponto de análise 7).....	177
Figura 145 - Aceleração no domínio da frequência: SC-6 (56 pessoas; ponto de análise 7).....	177

Figura 146 - Aceleração no domínio da frequência: SC-10 (88 pessoas; ponto de análise 7).....	178
Figura 147 - Aceleração no domínio da frequência: SC-15 (128 pessoas; ponto de análise 2).....	178
Figura 148 - Espectros de deslocamento, no domínio do tempo: SC-1 e SC-15 ....	180
Figura 149 - Espectros de deslocamento, no domínio da frequência: SC-1 e SC-15 .....	180
Figura 150 - Espectros de aceleração, no domínio do tempo: SC-1 e SC-5.....	181
Figura 151 - Espectros de aceleração, no domínio da frequência: SC-1 e SC-5 ....	181
Figura 152 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-1 (ponto de análise 7).....	206
Figura 153 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-6 (ponto de análise 7).....	206
Figura 154 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-10 (ponto de análise 7).....	206
Figura 155 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-15 (ponto de análise 2).....	207
Figura 156 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-1 (ponto de análise 7).....	207
Figura 157 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-6 (ponto de análise 7).....	207
Figura 158 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-10 (ponto de análise 7).....	208
Figura 159 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-15 (ponto de análise 2).....	208

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carga estática equivalente de carregamentos dinâmicos segundo vários autores (JONES; REYNOLDS; PAVIC, 2011; MCDONALD, 2015) .....	39
Tabela 2 - Coeficientes de Fourier e ângulos de fase para saltos (BACHMANN et al., 1995) .....	41
Tabela 3— Coeficientes de Fourier e ângulos de fase para saltos (ELLIS; JI, 2004b; JI; ELLIS, 1994; SMITH, A.L.; HICKS, S.J.; DEVINE, 2009).....	42
Tabela 4 - Parâmetros analíticos $T$ , $T_c$ e $K_p$ para estrutura rígida (FAISCA, 2003) ...	45
Tabela 5 - Influência da ocupação humana sobre a frequência natural e amortecimento estrutural (FALATI, 1999) .....	51
Tabela 6 - Força dura gerada pela pessoa. Plataforma de força (GASPAR, 2018) ..	63
Tabela 7 - Deslocamentos, velocidades e acelerações das pessoas (GASPAR, 2018) .....	64
Tabela 8 - Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas (NBR 6118, 2014, p. 173) .....	67
Tabela 9 - Faixas dos fatores de multiplicação usados em muitos países para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios com respeito à resposta humana (ISO 10137, 2007, p. 34) .....	70
Tabela 10 - Valores de dose de vibração ( $m/s^{1.75}$ ) acima dos quais vários níveis de comentários adversos podem ser esperados em edifícios residenciais (ISO 10137, 2007, p. 35). .....	74
Tabela 11 - Valores de dose de vibração ( $m/s^{1.75}$ ) que podem resultar na probabilidade de comentários adversos em edifícios residenciais (BS 6472-1, 2008, p. 12) .....	77
Tabela 12 - Faixas de frequências de atividades humanas (AISC, 2016, p. 12).....	79
Tabela 13 - Carregamento estimado durante atividades rítmicas (AISC, 2016, p. 38) .....	81
Tabela 14 - Aplicação do critério de projeto de acordo com a equação (23) para atividades rítmicas (AISC, 2016, p. 39) .....	83

Tabela 15 - Características dos modelos de um grau de liberdade (1GL) sem amortecimento de uma pessoa passiva parada em pé (HOTHAN, 1999; WILLIAMS et al., 1999) .....	86
Tabela 16 - Parâmetros biodinâmicos dos seis modelos em (MATSUMOTO e GRIFFIN, 2003).....	87
Tabela 17- Parâmetros dinâmicos dos modelos de corpo humano passivo em pé por diferentes estudos .....	89
Tabela 18 - Características do acelerômetro Dytran .....	104
Tabela 19 - Características da célula de carga .....	105
Tabela 20 - Análise Qualitativa das forças exercidas pelas pessoas .....	117
Tabela 21 - Analogia entre Natureza e Algoritmo Genético (AG).....	126
Tabela 22 - Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 1 a 25 .....	130
Tabela 23 - Valores estatísticos das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos .....	130
Tabela 24 - Correlação de Pearson (r) das pessoas 1 a 25.....	133
Tabela 25 - Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as variáveis.....	135
Tabela 26 - Dados obtidos a partir de regressões.....	135
Tabela 27 - Características geométricas das vigas e colunas (dimensões em milímetros).....	140
Tabela 28 - Características modais do piso misto investigado (aço-concreto).....	149
Tabela 29 - Frequências naturais recomendadas para atividade aeróbica .....	151
Tabela 30 - Características modais do modelo estrutural ocupada: Frequência fundamental.....	153
Tabela 31 - Situações de carregamento investigadas.....	160
Tabela 32- Posicionamento dos pontos de leitura.....	168
Tabela 33 - Acelerações verticais máximas: SC-1 .....	182
Tabela 34 - Acelerações verticais máximas: SC-2 .....	183
Tabela 35 - Acelerações verticais máximas: SC-3 .....	184
Tabela 36 - Acelerações verticais máximas: SC-4 .....	185
Tabela 37 - Acelerações verticais máximas: SC-5 .....	186
Tabela 38 - Acelerações verticais máximas: SC-6 .....	187
Tabela 39 - Acelerações verticais máximas: SC-7 .....	188

Tabela 40 - Acelerações verticais máximas: SC-8 .....	189
Tabela 41 - Acelerações verticais máximas: SC-9 .....	190
Tabela 42 - Acelerações verticais máximas: SC-10 .....	191
Tabela 43 - Acelerações verticais máximas: SC-11 .....	192
Tabela 44 - Acelerações verticais máximas: SC-12 .....	193
Tabela 45 - Acelerações verticais máximas: SC-13 .....	194
Tabela 46 - Acelerações verticais máximas: SC-14 .....	195
Tabela 47 - Acelerações verticais máximas: SC-15 .....	196
Tabela 48 - Limites de aceleração em RMS (ISO 2631/1, 1997) .....	199
Tabela 49 - Limites de aceleração em RMS (SCI, 2009) .....	200
Tabela 50 - Limites de aceleração em VDV (SETAREH, 2012) .....	200
Tabela 51 - Limites de aceleração em VDV (ELLIS; LITTLER, 2004) .....	200
Tabela 52 - Acelerações verticais máximas .....	201
Tabela 53 - Parâmetros da função Hanning .....	204
Tabela 54 - Parâmetros da Função matemática desenvolvida por Ellis e Ji (2004) .....	205
Tabela 55 - Valores das características dinâmicas das pessoas 1 a 25 .....	235
Tabela 56 - Valores das características dinâmicas das pessoas 26 a 50 .....	236
Tabela 57 - Valores das características dinâmicas das pessoas 51 a 75 .....	237
Tabela 58 - Valores das características dinâmicas das pessoas 76 a 100 .....	238
Tabela 59 - Correlação de Pearson (r) entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 1 a 25 .....	239
Tabela 60 - Correlação de Pearson (r) entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 26 a 50 .....	240
Tabela 61 - Correlação de Pearson (r) entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 51 a 75 .....	241
Tabela 62 - Correlação de Pearson (r) entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 76 a 100 .....	242

## 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
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 do piso misto
$n$	número de elementos ou termos
$N$	newton
$P$	peso da pessoa
$P_{gnd}$	força de reação do piso (rígido)
$P'_{gnd}$	força de reação do piso (em vibração)

RMS	valor quadrático médio ( <i>root mean square</i> )
$r$	coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ )
$r_{n,v}$	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
$U_{ha}$	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
$v_{RMS}$	velocidade <i>RMS</i>
$v_{fpa1}$	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 $i$
	decremento logarítmico
$\omega$	frequência angular da força externa

$\omega_i$	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>26</b>
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>31</b>
<b>1.1 Considerações iniciais</b> .....	<b>31</b>
<b>1.2 Atividades humanas rítmicas</b> .....	<b>31</b>
1.2.1 Atividades aeróbicas baseadas em saltos rítmicos .....	34
<b>1.3 Modelos matemáticos de carregamento dinâmico das atividades humanas</b> .....	<b>38</b>
1.3.1 Modelos de carga equivalente .....	38
1.3.2 Modelos periódicos .....	39
<b>1.4 Influência da interação ser humano-estrutura</b> .....	<b>46</b>
1.4.1 Considerações iniciais .....	46
1.4.2 Efeito da interação ser humano-estrutura .....	49
<b>1.5 Critérios de conforto humano</b> .....	<b>64</b>
1.5.1 Norma NBR 8800 (2008) .....	65
1.5.2 Norma NBR 6118 (2014) .....	66
1.5.3 Norma ISO 10137 (2007).....	68
1.5.4 Norma Inglesa BS 6472-1 (2008) .....	74
1.5.5 Guia do SCI (2009).....	78
1.5.6 Guia Prático do AISC (2016) .....	78
<b>1.6 Considerações finais</b> .....	<b>84</b>
<b>2 MODELAGEM DO CORPO HUMANO</b> .....	<b>85</b>
<b>2.1. Considerações iniciais</b> .....	<b>85</b>
<b>2.2 Modelo biodinâmico</b> .....	<b>85</b>
<b>2.3 Modelos biodinâmicos considerando a vibração estrutural</b> .....	<b>88</b>
<b>2.4 Considerações finais</b> .....	<b>91</b>
<b>3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>92</b>
<b>3.1. Considerações iniciais</b> .....	<b>92</b>
<b>3.2. Descrição dos testes experimentais</b> .....	<b>92</b>
<b>3.3. Equipamentos empregados nos testes experimentais</b> .....	<b>102</b>
3.3.1 Acelerômetro Capacitivo Dytran .....	102

3.3.2	Célula de carga.....	104
3.3.3	Plataforma de MDF .....	106
3.3.4	ADS 2002 (sistema de aquisição de dados).....	108
<b>3.4.</b>	<b>Respostas dos testes experimentais .....</b>	<b>110</b>
<b>3.4.1.</b>	<b>Domínio do tempo .....</b>	<b>111</b>
<b>3.4.2.</b>	<b>Domínio da frequência .....</b>	<b>117</b>
<b>3.5.</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>121</b>
<b>4</b>	<b>MODELAGEM DO SISTEMA BIODINÂMICO PROPOSTO .....</b>	<b>122</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações iniciais .....</b>	<b>122</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelo biodinâmico proposto.....</b>	<b>122</b>
<b>4.3</b>	<b>Definição do problema de otimização.....</b>	<b>124</b>
4.3.1	Método de otimização: Algoritmo genético via Matlab .....	125
4.3.1.1	Parâmetros utilizados na otimização via algoritmo genético (AG) .....	126
4.3.2	Aplicação do método de otimização .....	127
4.3.3	Valores dos parâmetros biodinâmicos .....	129
4.3.4	Relação entre os parâmetros biodinâmicos via regressão linear.....	134
<b>4.4</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>137</b>
<b>5</b>	<b>MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO .....</b>	<b>138</b>
<b>5.1</b>	<b>Considerações iniciais .....</b>	<b>138</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelo estrutural do piso .....</b>	<b>138</b>
<b>5.3</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>140</b>
<b>6</b>	<b>MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL.....</b>	<b>141</b>
<b>6.1</b>	<b>Considerações iniciais .....</b>	<b>141</b>
<b>6.2</b>	<b>Modelagem numérico-computacional do sistema estrutural investigado</b>	<b>141</b>
<b>6.3</b>	<b>Elementos finitos utilizados .....</b>	<b>143</b>
<b>6.4</b>	<b>Modelagem do amortecimento estrutural.....</b>	<b>146</b>
<b>6.5</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>148</b>
<b>7</b>	<b>FREQUENCIAS E MODOS DE VIBRAÇÃO.....</b>	<b>149</b>
<b>7.1</b>	<b>Considerações iniciais .....</b>	<b>149</b>
<b>7.2</b>	<b>Análise das frequências naturais do piso misto vazio.....</b>	<b>149</b>
<b>7.3</b>	<b>Análise das frequências naturais do piso ocupado .....</b>	<b>151</b>
<b>7.4</b>	<b>Influência da ocupação do piso misto sobre as frequências naturais ..</b>	<b>154</b>

7.5	Influência da ocupação do piso misto no amortecimento estrutural.....	156
7.6	Considerações finais.....	157
8	<b>ANÁLISE TRANSIENTE E AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO.....</b>	<b>159</b>
8.1	Considerações iniciais.....	159
8.2	Definição das situações de carregamento (sistemas biodinâmicos).....	160
8.3	Seções estruturais utilizadas para obtenção das respostas dinâmicas	168
8.4	Estudo do comportamento estrutural dinâmico global: modelos biodinâmicos .....	169
8.4.1	Domínio do tempo .....	169
8.4.2	Domínio da frequência.....	174
8.4.3	Comparação entre as situações de carregamento SC-1 e SC-15 .....	179
8.5	<b>Análise quantitativa das situações de carregamento: modelos biodinâmicos .....</b>	<b>182</b>
8.6	<b>Análise do conforto humano .....</b>	<b>198</b>
8.7	<b>Análise dos resultados: sistemas biodinâmicos versus modelos de “força dura” .....</b>	<b>202</b>
8.7.1	Parâmetros utilizados no modelo biodinâmico proposto.....	202
8.7.2	Parâmetros utilizados no modelo desenvolvido por Faisca (2003).....	203
8.7.3	Parâmetros utilizados no modelo de força dura presente no SCI (2009) .....	204
8.7.4	Análise comparativa dos resultados obtidos.....	205
8.8	<b>Considerações do capítulo .....</b>	<b>210</b>
9	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>212</b>
9.1	Introdução .....	212
9.2	Conclusões alcançadas .....	214
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>221</b>
	<b>APÊNDICE A – Valores das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos da modelagem biodinâmica proposta das pessoas 1 a 100.....</b>	<b>235</b>
	<b>APÊNDICE B – Valores da correlação de Pearson (r) entre a força experimental (<math>F_{d1}</math>) e a força otimizada (<math>F_d</math>) das pessoas 1 a 100 .....</b>	<b>239</b>
	<b>APÊNDICE C – Características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos consideradas para as situações de carregamento SC-1 a SC-15 .....</b>	<b>243</b>

## INTRODUÇÃO

Atualmente, as estruturas aliam-se tanto a multifuncionalidade das edificações, como prédios residenciais com áreas comerciais, lazer e prática de atividades físicas, quanto tendências arquitetônicas e construtivas pela ampliação de espaços ao projetar estruturas com materiais mais leves e vãos livres maiores. Tais fatos somados as exigências do mercado conduzem a sistemas estruturais complexos. Portanto, exigem do engenheiro civil experiência, que aliados ao conhecimento dos materiais e novas técnicas construtivas, buscam a melhor estrutura a ser adotada.

Neste sentido, observa-se o desenvolvimento de projetos com sistemas estruturais cada vez mais flexíveis e esbeltos, resultando em baixos valores de amortecimento estrutural e frequências naturais, nos quais se aproximam a faixa de frequências associadas às atividades humanas como andar, correr, saltar e dançar. Quando as atividades humanas são realizadas de modo coletivo e sincronizadas, podem levar a grandes cargas dinâmicas. Assim, as construções destinadas a residências, escritórios e academias tornam-se mais suscetíveis a problemas de vibrações excessivas, que geram desde o desconforto humano até mesmo o comprometimento da estrutura.

Recentemente, diversas pessoas saíram assustadas de um prédio comercial de 13 andares, devido às vibrações transmitidas pelas atividades coletivas realizadas por 50 pessoas no último andar. Essas atividades se caracterizavam por saltos realizados no último andar, numa palestra motivacional promovida por uma empresa, de tal modo que as vibrações foram transmitidas aos andares inferiores e por consequência causaram desconforto das pessoas (G1). Tal situação demonstra a necessidade de investigar a representação das atividades humanas, de forma a avaliar ainda na fase de projeto o nível de vibrações em que o sistema estrutural está submetido, assim como ao conforto humano dos usuários. Conseqüentemente, a interação ser humano-estrutura precisa ser considerada ao projetar estruturas submetidas às atividades humanas, e principalmente quando há sincronização dos movimentos pela multidão presente.

Diversos pesquisadores (BACHMANN et al., 1995; FAISCA, 2003; ELLIS; JI, 2004; ISO 10137, 2007; MURRAY et al., 2016; SMITH; HICKS.; DEVINE, 2009) representaram matematicamente o carregamento humano através de uma série de Fourier, com base em testes experimentais, considerando uma parte estática (peso individual) e outra parte devido à carga dinâmica (variável no tempo). Entretanto, tais funções matemáticas tem se mostrado conservadoras em relação ao custo final do projeto (CAPPELLINI, 2015; GASPAR; SILVA, 2015). Entretanto, recentes estudos têm considerado, de forma mais realista, a interação ser humano-estrutura, através de modelos biodinâmicos, deste modo, envolvendo a interdisciplinaridade com a área da Biomecânica (CAPPELLINI, 2015; JONES; REYNOLDS; PAVIC, 2011). Neste trabalho, as atividades humanas rítmicas são representadas pelos sistemas biodinâmicos, realizando saltos sincronizados semelhantes aos executados numa aula aeróbica (jump).

Assim sendo, o engenheiro civil tem a responsabilidade de projetar estruturas respeitando o estado limite de serviço, sob o ponto de vista do conforto humano em relação a aceleração do piso. Além disso, deve-se também realizar a tradicional verificação do estado limite último, a fim de garantir a resistência e estabilidade da estrutura, mesmo não levando em conta os efeitos dinâmicos intrínsecos às atividades humanas em relação ao conforto humano estrutural.

## **Motivação**

Os sistemas estruturais de pisos de edificações devem ser projetados de modo a garantir os estados limites últimos e de utilização. Um ponto importante que tem sido alvo de inúmeras investigações, em diversos centros de pesquisa no Brasil e no exterior, diz respeito a avaliações pertinentes ao bem-estar dos usuários (conforto humano), sob o ponto de vista da atenuação de possíveis vibrações excessivas. Neste sentido, este trabalho de pesquisa objetiva apresentar aos engenheiros projetistas, arquitetos e construtores a importância da análise de vibrações para a concepção e projeto de estruturas. Para tal, pretende-se dar uma contribuição para esta filosofia de projeto na qual o estado limite de serviço referente

a vibrações pode ser preponderante para o dimensionamento, no que tange ao bem-estar das pessoas que utilizam as edificações, em longo prazo, como no que diz respeito a custos adicionais para o reparo devido a vibrações estruturais excessivas (desconforto humano). Diante deste contexto, torna-se relevante a consideração efetiva da interação dinâmica ser humano-estrutura, de maneira a avaliar quantitativamente e qualitativamente o efeito de ações humanas rítmicas sobre o comportamento dinâmico de pisos de edificações. Desta forma, os sistemas estruturais de pisos de edifícios podem ser dimensionados de maneira mais condizente com a realidade de prática de projeto, satisfazendo critérios de segurança, conforto e economia.

## **Objetivos**

Este trabalho de pesquisa objetiva avaliar o comportamento dinâmico de pisos de edifícios, quando submetidos a atividades humanas rítmicas (atividades aeróbicas). O foco principal desta investigação diz respeito à consideração do ser humano praticando atividade aeróbica, através do 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 das pessoas mediante a consideração do efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura. As características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) foram determinadas mediante a realização de testes experimentais e com base na resolução matemática de um problema clássico de otimização, mediante a utilização de Algoritmos Genéticos (AG). Em relação aos testes experimentais, realizaram-se saltos individuais sobre uma plataforma de MDF com 100 pessoas, com o intuito de medir e gravar a aceleração do corpo humano e força exercida pelo mesmo sobre a plataforma, objetivando a implementação dessas informações (aceleração e força) para solucionar matematicamente o problema de otimização. Além disso, as atividades humanas rítmicas foram simuladas através de dois modelos de força dura, com o intuito de compará-los com os sistemas biodinâmicos propostos. Posteriormente, realizou-se uma análise de conforto humano do piso misto investigado, a partir da simulação das pessoas a partir do

emprego de modelos biodinâmico e força dura, com base nos valores estabelecidos por normas e recomendações internacionais de projeto, no que tange ao conforto humano. O conforto humano foi avaliado através das respostas estruturais em termos dos valores das acelerações de pico, RMS e VDV.

## **Estrutura da Tese**

Com o intuito de atender aos objetivos e à metodologia descritos anteriormente, este trabalho de pesquisa está subdividido em nove capítulos, descritos a seguir.

No primeiro capítulo é realizada uma revisão bibliográfica, apresentando trabalhos relacionados aos efeitos da interação ser humano- estrutura sobre as características dinâmicas dos sistemas estruturais e suas implicações no conforto humano dos usuários. Conseqüentemente, abordam os modelos de carregamento dinâmico das atividades humanas e por fim, os critérios de conforto humano com base em normas e guias de projeto.

No segundo capítulo é abordada a modelagem biodinâmica do corpo humano, sob dois aspectos, sendo que o primeiro considera o ser humano apoiado a uma base fixa, enquanto o segundo contempla o acoplamento do modelo a um sistema de um grau de liberdade (S1GL) simulando o sistema estrutural.

No terceiro capítulo é descrito os ensaios experimentais realizados em laboratório, sendo apresentados desde os equipamentos empregados até o registro das informações pelo sistema de aquisição de dados.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia aplicada na determinação dos parâmetros do modelo biodinâmico proposto para simular o ser humano nas análises numéricas.

No quinto capítulo é apresentada a descrição do modelo estrutural utilizado na análise e todos os detalhes pertinentes, com a descrição de dimensões do piso misto investigado, características dos materiais e suas propriedades físicas.

No sexto capítulo é abordada a modelagem em elementos finitos do sistema estrutural ilustrado no quinto capítulo, os tipos de elementos finitos adotados na

modelagem numérico-computacional, inclusive o elemento referente ao modelo biodinâmico do corpo humano, e por fim a modelagem do amortecimento estrutural.

No sétimo capítulo é realizada a avaliação do comportamento dinâmico do piso misto, através de sua vibração livre, onde foram obtidas suas frequências naturais e seus respectivos modos de vibração, considerando a estrutura vazia e ocupada pelas pessoas.

No oitavo capítulo é apresentada a análise dinâmica da estrutura, quando submetida às atividades humanas, através dos valores das acelerações e deslocamento no domínio do tempo e da frequência, onde os referidos valores são comparados com as normas e recomendações de projeto disponíveis na literatura. Além disso, apresentou-se a comparação das respostas entre a modelagem biodinâmica e modelos de força dura, em termos da aceleração no domínio do tempo e frequência.

No nono capítulo são apresentadas as conclusões, de forma a contribuir para o avanço desta linha de pesquisa, além de propostas para trabalhos futuros.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são contemplados estudos desenvolvidos por diversos autores, com base na definição do conceito de atividade humana rítmica (seção 1.2), visando buscar o melhor entendimento do comportamento humano, principalmente sob o ponto de vista dos saltos rítmicos. Nas últimas décadas, observa-se o crescente aumento de relatos de problemas relacionado a vibrações excessivas de estruturas devido à presença humana. Neste sentido, a seção 1.3 apresenta os modelos de carregamento dinâmico existentes para representar as ações humanas rítmicas. Além disso, os trabalhos relacionados à interação ser humano-estrutura são apresentados na seção 1.4, visto que tanto as atividades humanas causam efeitos no sistema estrutural, quanto às vibrações estruturais afetam o ser humano presente na estrutura. Por fim, os critérios de conforto humano, baseado em guias e normas de projetos são descritos na seção 1.5.

### 1.2 Atividades humanas rítmicas

O ser humano possui habilidade de realizar diversos movimentos corporais, tais como andar, sentar, permanecer em pé, correr, balançar (joelhos fletidos) e por fim, saltar. Quando há uma concentração de pessoas em ambiente de convivência coletiva como academia, trabalho, eventos esportivos e danceteria, percebe-se que a presença humana pode ser dividida em pessoas passivas e ativas. Neste sentido, a pessoa ativa atua como carregamento dinâmico até sete vezes maiores que o peso estático corporal [BACHMANN; AMMANN, 1987], dependendo da atividade realizada, enquanto a pessoa passiva [sentadas ou em pé] interage com a estrutura, resultando na redução da resposta e propriedades modais da estrutura [ver capítulo 1.4.1]. As Figuras 1 a 3 ilustram as atividades realizadas por pessoas ativas.

A consideração do carregamento dinâmico, proveniente das atividades exercidas por pessoas ativas [Figuras 1 a 3], é importante no desenvolvimento de projetos estruturais, além de ser considerada uma das cargas mais desafiadoras a serem determinadas. Estas cargas dinâmicas são o resultado de uma série de movimentos realizados, tais como: andar, correr, sentar, salta e balanço do corpo (joelhos flexionados). O carregamento dinâmico proveniente destas atividades descritas anteriormente induz vibrações sobre o sistema estrutural, de tal modo que dependendo de fatores como tipo e intensidade da atividade e sincronização, podem causar diferentes níveis de desconforto humano.

Segundo Alves (1997), as atividades humanas podem ser divididas em duas categorias. A primeira está relacionada às atividades sem perda de contato com a estrutura, como a caminhada, enquanto a segunda categoria se refere àquelas atividades em que existem a perda de contato com a estrutura, como a ginástica aeróbica.



a) Corrida (FREEPIK)



b) Ginástica aeróbica (GNT)

Figura 1 - Atividades Humanas rítmicas



a) Caminhada (DEPOSIPHOTOS)



b) Boate (TOTALCONTROL)

Figura 2 - Atividades Humanas rítmicas



Figura 3 - Atividades Humanas rítmicas. Shows (CORREIO DO POVO)

A representação matemática do carregamento proveniente das atividades humanas rítmicas é um problema complexo devido às características intrínsecas ao indivíduo. Neste aspecto, nota-se que as diferenças psicológicas e fisiológicas entre os indivíduos, tais como idade, peso, habilidade física, o tipo de calçado e o modo como cada indivíduo realiza tal atividade, influenciam na execução do movimento. Além disso, outros fatores importantes são os estímulos, tais como sonoros, visuais e táteis com outros indivíduos, durante a atividade. Tal avaliação destas questões dificulta o desenvolvimento de um modelo de carregamento dinâmico que descreva adequadamente as ações humanas rítmicas. Apesar das dificuldades apresentadas anteriormente, é necessário prosseguir nesta linha de pesquisa visando evitar projetos conservadores e antieconômicos, já que busca-se atualmente desempenho e minimização de custos e materiais empregados (MCDONALD, 2015). Na sequência, os movimentos referentes às atividades relacionadas ao salto são descritos.

### 1.2.1 Atividades aeróbicas baseadas em saltos rítmicos

Os saltos de maneira geral são caracterizados por “movimentos na direção vertical, removendo todo o corpo do contato com o solo por um determinado tempo” (JONES et al., 2011). Nesta atividade, inicia-se o movimento com a preparação ao salto, e seguidamente são flexionados os joelhos de forma simultânea a sua projeção para frente com objetivo de impulsionar o salto. Em seguida, o salto propriamente dito é realizado, onde há a perda de contato do indivíduo com o solo e por fim, o indivíduo aterrissa na estrutura, retomando novamente o contato com o solo e a preparação para saltar-se novamente, conforme ilustração da Figura 4. Alguns pesquisadores [TUAN; JI, 1985; ELLIS; JI, 1994] consideram que é o pior tipo de atividade sob o ponto de vista do elevado impacto e força dinâmica sobre a estrutura.

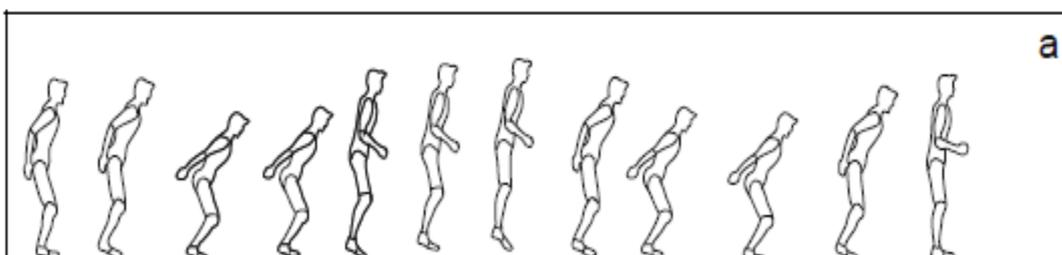


Figura 4 - Fases do movimento (adaptado de MEGHDARI e ARYANPOUR, 2003)

Além disso, existe um subtipo de salto denominado “saltos rítmicos”, 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 [TUAN; SAUL, 1985; EBRAHIMPOUR; SACK, 1989], além de representar um comportamento comum da multidão. A Figura 5 ilustra o movimento dos saltos rítmicos. O salto rítmico ocorre mais frequentemente na presença de música ou eventos em que as multidões são incentivadas a movimentar-se, batendo palmas ou dançando. A música incentiva a realização de saltos e, através de sua batida, estimula um ritmo de salto específico, de tal modo que o carregamento dinâmico na frequência da música pode ocasionar grandes vibrações estruturais [LITTLE, 2002; PARKHOUSE; EWINS, 2006]. As instalações esportivas que abrigam

os shows, além de academias voltadas a atividades aeróbicas, são frequentemente mais vulneráveis a este tipo de atividade humana rítmica [BBC, 1999; MANCHESTER EVENING NEWS, 2007]. Atualmente, a atividade aeróbica que se enquadra nestes movimentos é denominada “Jump”, de forma que as pessoas saltam sobre uma plataforma elástica, realizando movimentos de saltos através de estímulos sonoros, provenientes de músicas de elevadas frequências para estimular os movimentos, conforme as Figuras 6 a 8. O jump é a atividade simulada neste trabalho, conforme será apresentado no capítulo 3.

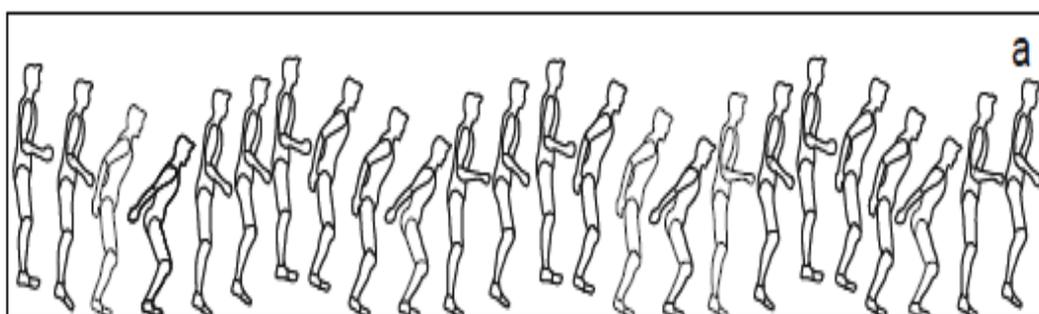


Figura 5 - Saltos rítmicos (adaptado de MEGHDARI e ARYANPOUR, 2003)



Figura 6 - Saltos rítmicos realizados no jump (PHILLYMAG)



Figura 7 - Saltos rítmicos realizados nos movimentos do jump (LUNGESANDLYCRA)



Figura 8 - Saltos rítmicos realizados no jump (JUMPING-FITNESS)

Em relação aos saltos rítmicos, é importante notar que o formato da representação gráfica da força do indivíduo no domínio do tempo [ver Figura 9], apresenta variação de forma à medida que se aumenta a frequência dos saltos.

Desta forma, saltos de baixa frequência representam movimentos lentos, predominantemente realizados sem contato com a estrutura e conseqüentemente o sujeito fica brevemente em repouso entre os saltos. Em vista deste comportamento, observa-se o surgimento de dois picos e um "intervalo estacionário" onde o indivíduo faz uma pausa entre os movimentos [NHLEKO et al., 2008; SIM et al., 2005]. O espectro de força é dominado pelo segundo harmônico forçado devido aos dois picos de força ao pular lentamente [YAO et al., 2006].

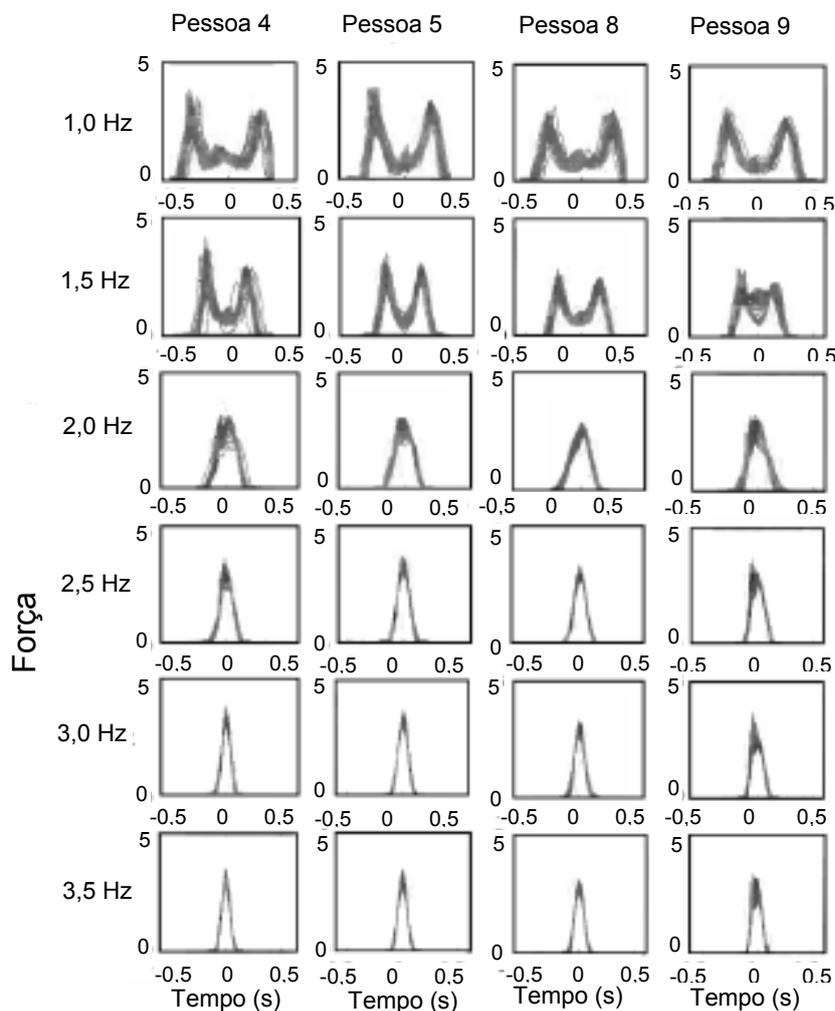


Figura 9 - Variação das frequências dos saltos (SIM et al., 2015)

Observa-se na Figura 9 que os saltos rítmicos realizados em frequências mais altas (2 Hz ou mais), o movimento torna-se mais rápido. O sujeito aterrissa na ponta dos pés e, sem pausa ou contato do calcanhar com o chão, volta para o próximo salto. Portanto, quanto maior a frequência, os dois picos de frequência se aproximam até fundirem para um pico, portanto o 1º harmônico domina o espectro.

Nos saltos executados sob a frequência de 1.5Hz, os picos são aproximados e a dominância é dividida entre o 1º e o 2º harmônico para diferentes pessoas. Potencialmente, a divisão na dominância ocorre quando a frequência alvo está entre os dois padrões de salto distintos e os sujeitos podem favorecer qualquer uma das ações de salto. Isso é observado quando pessoas saltam em frequências médias, como 1,5 Hz [YAO et al., 2006].

A comparação entre os indivíduos na Figura 9 demonstrou que as formas apresentam uma tendência similar. Entretanto, diferenças foram observadas nas 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].

### 1.3 Modelos matemáticos de carregamento dinâmico das atividades humanas

Conforme apresentado na seção 1.2, apesar da complexidade da representação matemática do comportamento do ser humano, devido as suas características intrínsecas, já que diferenças psicológicas e fisiológicas são notórias e influenciam na determinação de modelos matemáticos, trabalhos foram realizados para prever matematicamente as ações humanas rítmicas. Nessa seção são apresentados os modelos desenvolvidos, desde a consideração de cargas estáticas equivalentes a modelos periódicos.

#### 1.3.1 Modelos de carga equivalente

Inicialmente, as cargas dinâmicas induzidas pelas pessoas foram simuladas como carga estática equivalente. Entretanto, ainda é comum na prática corrente de projeto considerar estes carregamentos dinâmicos como modelos de carga estática equivalente. A norma brasileira NBR 6120 (2017) considera um valor mínimo de 5kN/m<sup>2</sup> para salão de danças e esportes [seção 1.5]. Segundo Ellis e Ji (2004b), o

valor de 5 kN/m<sup>2</sup> para multidões é usual na prática de projeto, correspondendo aproximadamente ao peso estático de 6 pessoas/m<sup>2</sup>. A Tabela 1 apresenta os vários valores de cargas estáticas equivalentes segundo diversos autores

Tabela 1 - Carga estática equivalente de carregamentos dinâmicos segundo vários autores (JONES; REYNOLDS; PAVIC, 2011; MCDONALD, 2015)

	Jones et al. (2011)	Tuan e Saul (1985)	Ebrahimpour et al (1986)	Moreland (1905)	Tilden (1913)
Ações	Estática	Salto rítmico	Salto periódico	Salto	“bouncing”
Frequência	-	2,20 Hz	3 Hz	-	-
Participantes	1	1	1	90	1
Carregamento observado	0,75 KN/pessoa	4,50 KN/pessoa	2,85 KN/pessoa	1,13 KN/pessoa	2,04 KN/pessoa
Carregamento estático equivalente	2,15 kN/m <sup>2</sup>	4,50 kN/m <sup>2</sup>	8,14 kN/m <sup>2</sup>	3,23 kN/m <sup>2</sup>	5,83 kN/m <sup>2</sup>

Deste modo, pode-se compreender que a hipótese de um carregamento estático se trata de uma ação externa à estrutura que é invariável ao longo do tempo, ou varia muito lentamente (AVELINO, 2008). Evidentemente, este comportamento não reflete a realidade das atividades humanas rítmicas, sendo, portanto, uma simplificação.

### 1.3.2 Modelos periódicos

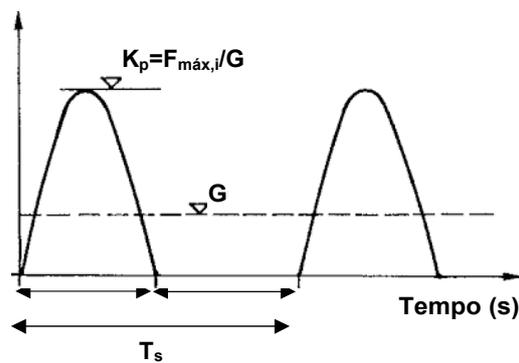
Diversos pesquisadores (BACHMANN; AMMANN, 1987; ELLIS.; JI, 1994; MARTÍNEZ et al., 2016; ISO 10137, 2007; RACIC; PAVIC, 2010b; SIM et al., 2008) desenvolveram funções matemáticas representando as ações humanas rítmicas. Logo, a partir de uma função de carregamento bem conhecida, os engenheiros estruturais podem utilizá-la para prever o comportamento dinâmico da estrutura.

Esses modelos periódicos ainda são utilizados por sua simplicidade e por serem preconizados pela norma internacional ISO 10137 (2007) e guias de projeto, tais como o americano American Institute of Steel Construction - AISC (2016) e o europeu The Steel Construction Institute - SCI (2009).

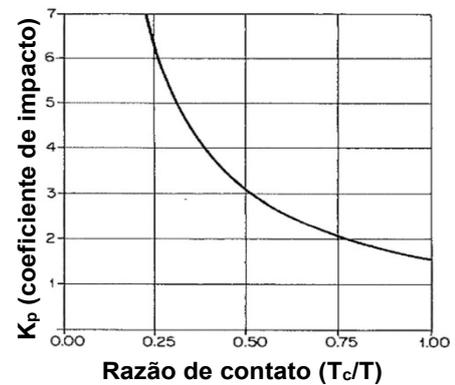
Modelos periódicos são caracterizados por parâmetros como coeficiente de impacto ( $K_p$ ), período da atividade ( $T$ ), e o período de contato dos pés com o solo ( $T_c$ ), constantes ao longo do tempo. Assim, a intravariabilidade da pessoa não é considerada.

O modelo de carga periódica foi proposto por diversos autores para simular a natureza repetitiva das atividades rítmicas. Assim, Bachmann e Ammann (1987) foram um dos primeiros modelos de carregamento dinâmico com perda de contato definido por uma função semisseno, conforme apresenta a equação (1) e Figura 10.

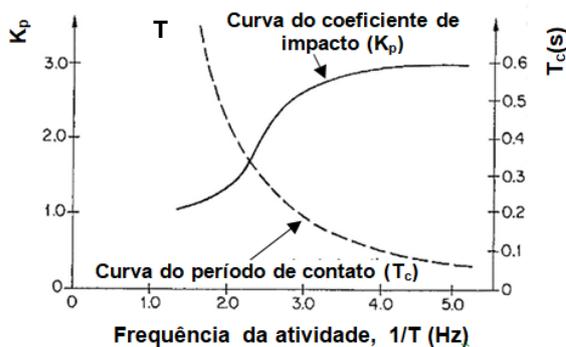
$$\begin{aligned}
 F(t) &= K_p G \sin\left(\frac{\pi t}{T_c}\right) && \text{Para } t \leq t_c \\
 F(t) &= 0 && \text{Para } T_c \leq t \leq T
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



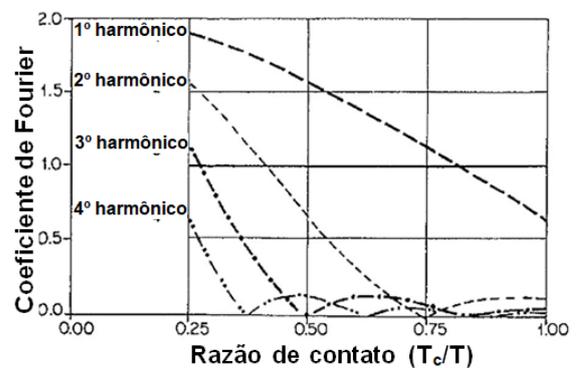
a) Função semisseno



b)  $K_p$  em função de  $T_c/T$



c)  $K_p$  e  $T_c$  em função da frequência de atividade  $1/T$



d) Coeficiente de Fourier em função da razão de contato ( $T_c/T$ )

Figura 10 - Modelo da função “semisseno” proposto por Bachmann e Ammann (1987) [Adaptado de Bachmann e Ammann (1987)]

Posteriormente, Bachmann et al. (1995) desenvolveram uma função matemática representada por uma série de Fourier, caracterizada por uma parcela estática (peso estático) e dinâmica, de acordo com a equação (2). Onde “ $r_i$ ” e “ $\varphi_i$ ” são o coeficiente de Fourier normalizado em relação ao peso estático e o ângulo de fase associado ao  $i$ -ésimo harmônico, respectivamente. Nota-se que a equação (2) apresenta uma forma mais generalista, podendo representar diversas atividades humanas (com e sem perda de contato com o solo), desde o caminhar até saltos rítmicos. Para isto, os autores especificaram vários valores de coeficientes de Fourier e ângulos de fase em função da frequência da atividade. A Tabela 2 apresenta estes valores para saltos rítmicos.

$$F(t) = G + \sum_{i=3}^n Gr_i \sin\left(\frac{2\pi i}{T}t - \varphi_i\right) \quad (2)$$

Tabela 2 - Coeficientes de Fourier e ângulos de fase para saltos (BACHMANN et al., 1995)

Atividade	Frequência (Hz)		Coeficiente de Fourier normalizado ( $r_i$ )			Ângulo de fase ( $\varphi_i$ )			Desidade (pessoas / m <sup>2</sup> )
			$r_1$	$r_2$	$r_3$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	
Saltos rítmicos	Normal	2,0	1,8	1,3	0,7	0	$\pi(1-T_c/T)$	0,25 (ginástica aeróbica) 0,5 (casos extremos)	
		3,0	1,7	1,1	0,5	0			
	Alto impacto	2,0	1,9	1,6	1,1	0			
		3,0	1,8	1,3	0,8	0			

Ji e Ellis (1994) e Ellis e Ji (1994) empregaram a função semisseno (equação (3)) para a representação matemática de saltos rítmicos e realizaram o cálculo dos coeficientes de Fourier e seus respectivos ângulos de fase em função da razão de contato ( $T_c/T$ ) para representar um pessoa ou pequenos grupos engajados em atividades rítmicas, conforme apresentado na Tabela 3. Posteriormente, através de testes experimentais, o coeficiente de Fourier normalizado – para cada harmônico – foi determinado a partir da divisão da amplitude do deslocamento dinâmico pelo respectivo deslocamento estático em função do número de pessoas. Nota-se,

portanto, que esta relação corresponde também ao fator de amplificação dinâmica. As equações (4), (5), (6) apresentam as funções analíticas para os três primeiros harmônicos respectivamente, obtidas através da regressão dos dados experimentais e em função do número de pessoas ( $p$ ), para  $2 \leq p \leq 64$ .

$$F(t) = G \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_n \sin \left( \frac{2\pi n}{T} t - \varphi_i \right) \right] \quad (3)$$

Tabela 3— Coeficientes de Fourier e ângulos de fase para saltos (ELLIS; JI, 2004b; JI; ELLIS, 1994; SMITH, A.L.; HICKS, S.J.; DEVINE, 2009).

Tipo de atividade		Coeficiente de Fourier normalizado ( $r_n$ )					
		1	2	3	4	5	6
Aeróbica de baixo impacto ( $\alpha=2/3=0,67$ )	$r_n$	1,286	0,164	0,133	0,036	0,023	0,032
	$\varphi_i$	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$
Aeróbica de alto impacto ( $\alpha=1/2=0,50$ )	$r_n$	1,571	0,667	0,000	0,133	0,000	0,057
	$\varphi_i$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
Salto normal ( $\alpha=1/3=0,33$ )	$r_n$	1,800	1,286	0,667	0,164	0,099	0,133
	$\varphi_i$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$-5\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$

$$r_{1,p} = 1,61 p^{-0,082} \quad (4)$$

$$r_{2,p} = 0,94 p^{-0,24} \quad (5)$$

$$r_{3,p} = 0,44 p^{-0,31} \quad (6)$$

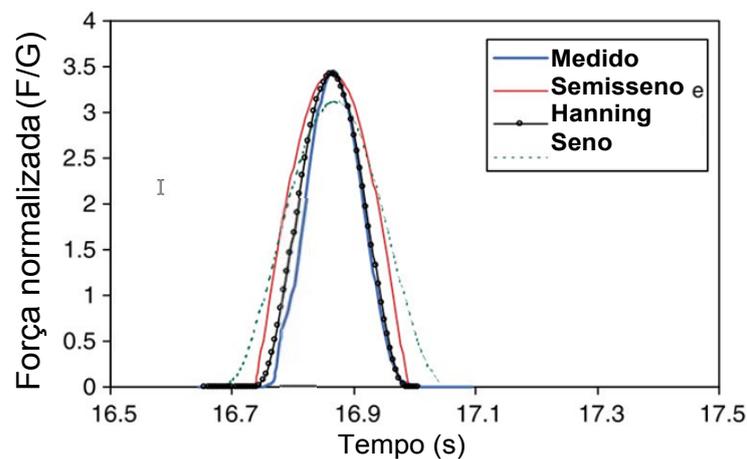
A norma ISO 10137 (2007) também utiliza a equação (2) para representar atividades rítmicas na direção vertical. Entretanto, os ângulos de fase podem ser considerados iguais a zero. O grande diferencial desta norma está na obtenção dos valores dos coeficientes de Fourier relativos aos três primeiros harmônicos em função da frequência da atividade, conforme as equações (7), (8) e (9), respectivamente.

$$r_{1,v} = 2,1 - 0,15(f_p) \quad (7)$$

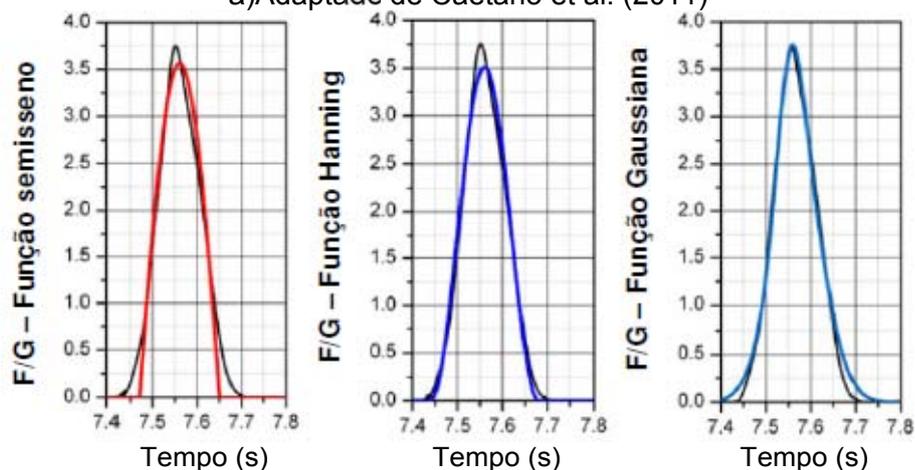
$$r_{2,v} = 1,9 - 0,17(2f_p) \quad (8)$$

$$r_{3,v} = 1,25 - 0,13(3f_p) \quad (9)$$

Outras funções matemáticas foram estudadas com o intuito de caracterizar os saltos rítmicos. Neste aspecto, podem-se citar as funções cosseno ao quadrado ( $\cos^2$ ) – também conhecida como função Hanning (ARRILLAGA; WATSON, 2003) – e a função gaussiana (distribuição normal). Tem-se notado que a função Hanning é capaz de se ajustar melhor à forma do sinal experimental produzido por saltos rítmicos (CAETANO; CUNHA; MOUTINHO, 2011; FAISCA, 2003; SIM et al., 2008), principalmente no que diz respeito ao período de contato,  $T_c$ , conforme pode ser observado na Figura 11.



a) Adaptado de Caetano et al. (2011)



b) Adaptado de Agu (2013)

Figura 11 - Ajuste de funções matemáticas ao sinal experimental (saltos rítmicos)

A função cosseno ao quadrado é definida pela equação (10), além disso, o coeficiente de impacto ( $k_p$ ) é apresentado na equação (11) (AGU, 2013; CAETANO; CUNHA; MOUTINHO, 2011).

$$F(t) = K_p G \cos^2\left(\frac{\pi t}{t_c}\right) \quad \text{Para } -T_c/2 \leq T_c/2 \quad (10)$$

$$K_p = \frac{2}{\frac{T_c}{T}} = \frac{2}{\alpha} \quad (11)$$

Extensos ensaios experimentais foram realizados por Faisca (2003), considerando testes realizados com diversas pessoas, sujeitas à estímulos sonoros e visuais; de maneira que sete tipos de atividades foram verificadas: saltos à vontade; saltos em 1,5 Hz; 2,0 Hz; 2,5 Hz; 3,0 Hz; ginástica aeróbica e simulações de eventos diversos, como shows musicais e torcidas de futebol. A equação (12) apresenta a função matemática. Observa-se que o parâmetro “CD” [ver Figura 12] é o coeficiente de defasagem com o objetivo de levar em conta a falta de sincronismo entre os indivíduos e, portanto, a ponderação do carregamento dinâmico da atividade rítmica. Faisca (2003) verificou que os parâmetros  $T$ ,  $T_c$  e  $K_p$  foram bem representados pela função de probabilidade gaussiana (distribuição normal) enquanto que a função Hanning (cosseno ao quadrado) se ajustou melhor para simular o carregamento dinâmico.

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[ 0,5 \quad 0,5 \cos\left(\frac{2\pi}{T_c} t\right) \right] \right\} \quad \text{Para } t \leq T_c \quad (12)$$

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

A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros analíticos do período da atividade, período de contato e coeficiente de impacto ajustados para a função Hanning em função de vários tipos de atividades rítmicas.

Tabela 4 - Parâmetros analíticos T, T<sub>c</sub> e K<sub>p</sub> para estrutura rígida (FAISCA, 2003)

Atividade	T (s)	T <sub>c</sub> (s)	K <sub>p</sub>
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
Saltos à vontade	0,44 ± 0,15	0,32 ± 0,09	3,17 ± 0,58
Saltos (2,0 Hz)	0,50 ± 0,10	0,36 ± 0,12	2,99 ± 0,65
Saltos (2,5 Hz)	0,40 ± 0,03	0,30 ± 0,07	3,20 ± 0,47
Saltos (3,0 Hz)	0,34 ± 0,12	0,26 ± 0,14	3,06 ± 0,38

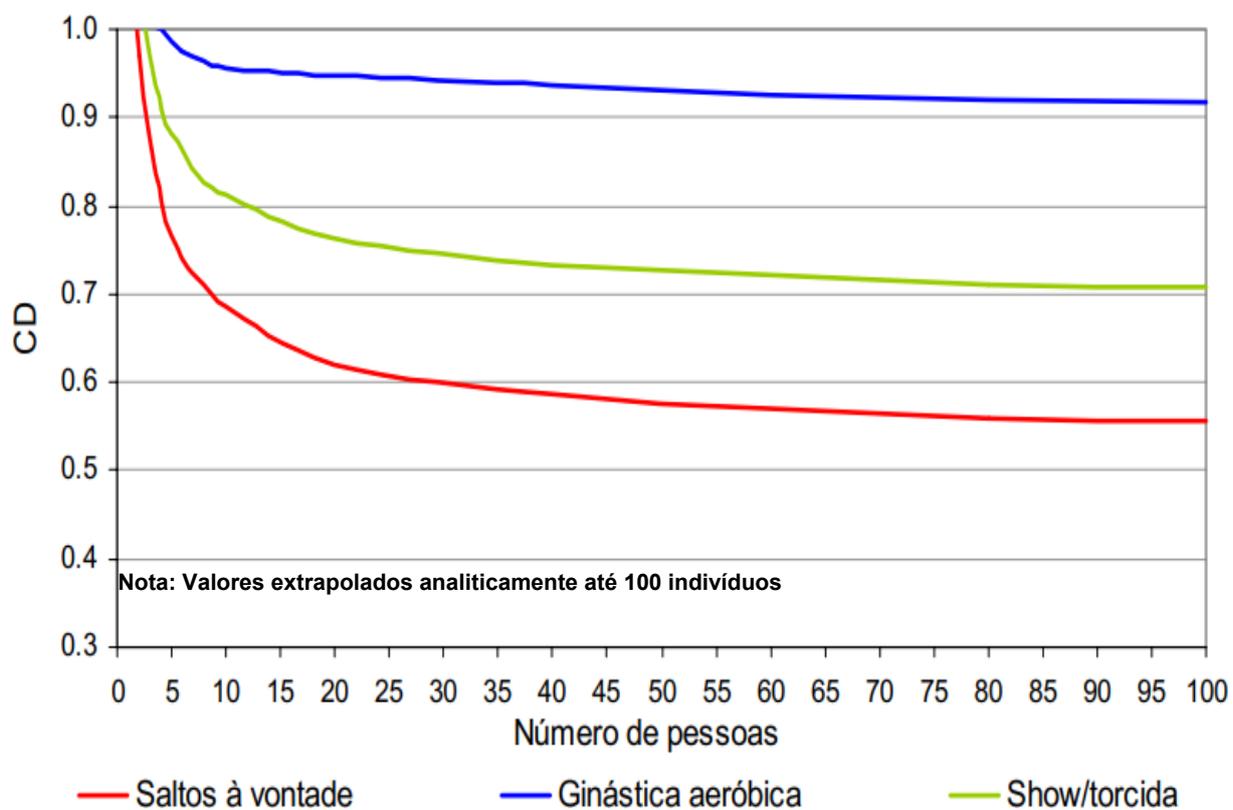


Figura 12 - CD em função da atividade e número de pessoas (FAISCA, 2003)

## 1.4 Influência da interação ser humano-estrutura

### 1.4.1 Considerações iniciais

Nas últimas décadas, este assunto tornou-se de grande importância no âmbito da engenharia civil. Inúmeros problemas relacionados à vibração excessiva de estruturas estão ocorrendo com maior frequência em espaços destinados às atividades humanas, como situações reais em estádios de futebol (RODRIGUES; ALMEIDA, 2006; NHLEKO, 2009), passarelas e edificações (G1). A utilização de sistemas estruturais mistos (aço-concreto) para a prática de atividades humanas, como ginásios, consiste em um problema complexo. Isto pode ser explicado pelo fato destas atividades e o corpo humano apresentarem um dos seus harmônicos de frequências próximas a frequência natural da maioria das estruturas, de 4 a 8 Hz. Conforme se observa na Figura 13, nossos órgãos internos (coração, fígado, rins e bexiga) possuem frequências naturais neste intervalo [4 a 8 Hz] (MURRAY (1981) apud VARELA (2004)). Conseqüentemente, pode ocorrer o fenômeno da ressonância, ocasionando mal-estar e desconforto dos usuários (CAMPISTA, 2015; GASPAR, 2013; GASPAR, 2015).

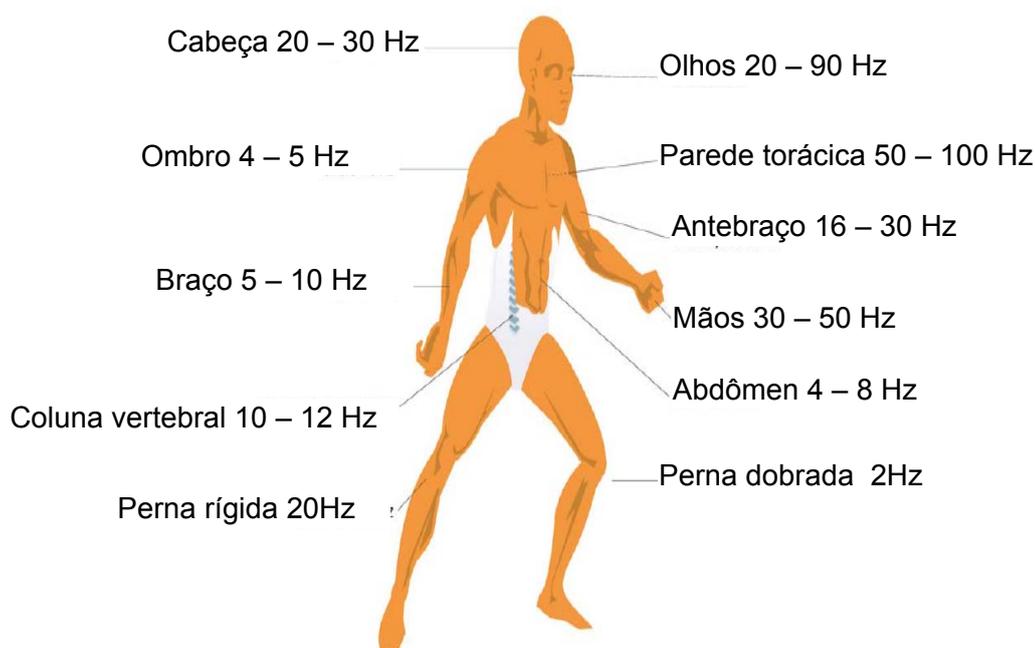


Figura 13 - Frequências características do corpo humano (SOEIRO, 2009)

A situação anteriormente apresentada relata apenas um dos aspectos da interação ser humano – estrutura, sob o ponto de vista da influência do sistema estrutural sobre as atividades humanas. Segundo Han, Zhou, e Ji (2017), a interação ser humano-estrutura pode ser analisada sob dois aspectos principais: como o sistema estrutural influencia a resposta e conforto humano (BOCIAN et al., 2015; RACIC; CHEN, 2015; SALYARDS;HUA, 2015); além de como os humanos afetam as propriedades dinâmicas e resposta estrutural (ING´OLFSSON; GEORGAKIS, 2011; QIN et al., 2012, 2013; CHEN et al., 2015; CAPPELLINI et al., 2016). O primeiro aspecto está relacionado no modo que as características dinâmicas estruturais [pisos flexíveis e rígidos], tais como massa, rigidez, amortecimento e frequência natural, podem interferir na vibração do sistema estrutural sujeito as ações dinâmicas como as atividades humanas, bem como na percepção humana às vibrações. Na sequência, o segundo aspecto se refere nos efeitos da presença humana sobre a estrutura, no que diz respeito às mudanças nas propriedades dinâmicas estruturais e vibrações excessivas da mesma.

Inicialmente, o corpo humano era considerado apenas como uma massa inerte sobre a estrutura, conforme apresenta a Figura 14. Tal consideração foi amplamente utilizada [ALLEN; RAINER, 1975; OHLSSON, 1983], conseqüentemente sua aplicação proporcionava a diminuição das frequências naturais das estruturas. Entretanto, diversos estudos [ELLIS; JI, 1997; BROWNJOHN, 1999; SACHES, 2002; SACHSE et al., 2003; REYNOLDS et al., 2004;2003; REYNOLDS; PAVIC, 2006] realizados a partir do final da década de 1990, destacaram as diferenças observadas entre as propriedades dinâmicas das estruturas vazias e ocupadas em estudos de caso individuais. Segundo Ellis e Ji (1997), a multidão atua como um sistema energizado com massa mola amortecedor para explicar o surgimento de um novo modo de vibração observado nos ensaios experimentais realizados. Similarmente, conforme os trabalhos descritos anteriormente, as diferenças nas propriedades dinâmicas são atribuídas à interação ser humano - estrutura, onde as pessoas atuam como um sistema dinâmico massa-mola-amortecedor. A Figura 15 apresenta a modelagem mais simples do sistema massa-mola-amortecedor, referente a interação ser humano-estrutura. O comportamento dinâmico desse sistema combinado [ser humano – estrutura] resulta

em uma mudança na frequência natural e, normalmente, propicia o aumento do nível de amortecimento do sistema.

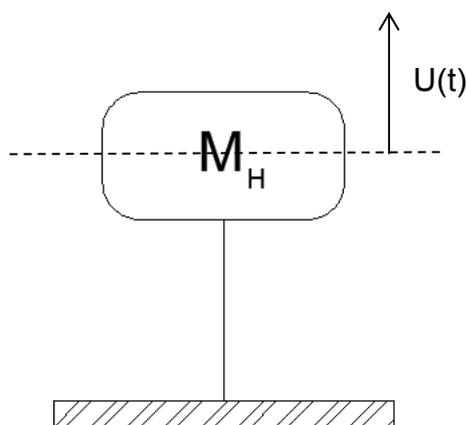


Figura 14 - Modelo de corpo humano como massa inerte

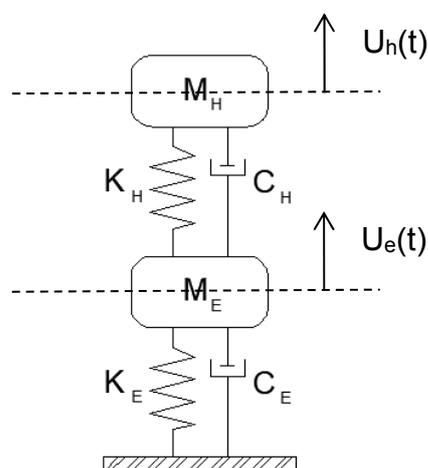


Figura 15 - Sistema massa-mola-amortecedor representando a interação ser humano-estrutura

Ainda em relação ao sistema dinâmico massa-mola-amortecedor, a resposta deste sistema ao carregamento humano é normalmente superestimada ao considerar as propriedades dinâmicas da estrutura vazia, resultando em uma estrutura superdimensionada. Além disso, considerando que as propriedades dinâmicas do sistema dinâmico forem utilizadas, espera-se que o desempenho dinâmico apresente maior precisão, bem como um projeto estrutural mais eficiente. É importante ressaltar a dificuldade existente ao determinar as propriedades dinâmicas do sistema, visto que fatores como postura, distribuição das pessoa/multidão e características físicas variável de pessoa para pessoas afetam nas propriedades dinâmicas do sistema dinâmico massa - mola- amortecedor. Além disso, a interação entre os ocupantes e estrutura depende da atividade realizada

sobre o sistema estrutural. Na sequência, os efeitos da interação ser humana – estrutura são apresentados.

#### 1.4.2 Efeito da interação ser humano-estrutura

Ellis e Ji (1997) realizaram um experimento na arquibancada do estádio de Twickenham vazia e ocupada por 4.000 espectadores (Figura 16), assim evidenciando a interação ser humano - estrutura. A Figura 16 demonstrou o surgimento de uma frequência natural devido as pessoas presentes na estrutura, bem como o aumento significativo do amortecimento estrutural quando as pessoas estavam ocupando a estrutura. Esses fenômenos demonstram que o corpo humano não atua como uma massa inerte, mas age como um sistema massa-mola-amortecedor sobre a estrutura.

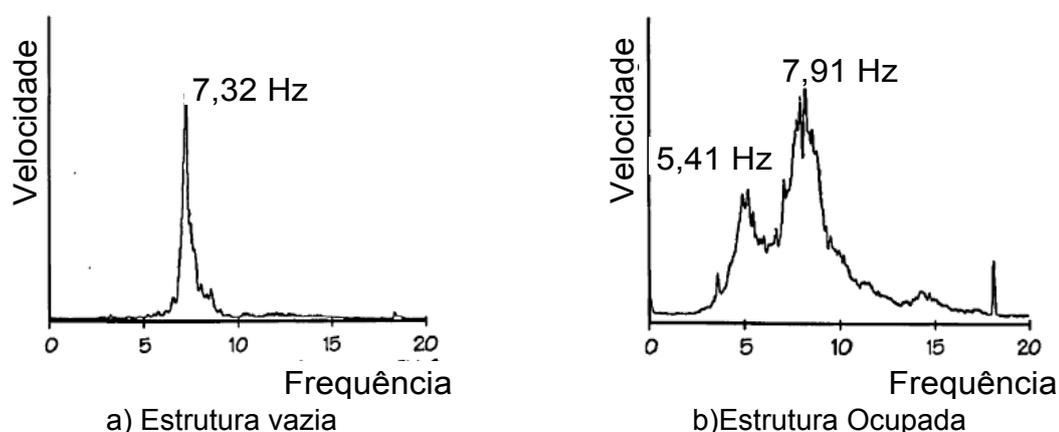


Figura 16 - Resposta dinâmica do estádio de Twickenham (ELLIS; JI, 1997)

Testes em laboratório foram realizados em uma estrutura de concreto pré-moldado, com massa de 1200 kg e frequência natural de 3,16 Hz (BROWNJOHN, 1999). O teste investigou a influência das diferentes posturas do indivíduo (80 kg) sobre as propriedades dinâmicas da estrutura, como apresentado na Figura 17. Os resultados obtidos demonstraram que cada postura ocasionou um efeito diferente na frequência natural da estrutura ocupada. Entretanto, todas as posturas resultaram em diminuição da frequência natural [Figura 18], além do aumento do amortecimento

estrutural. Apenas um pico de ressonância devido ao envolvimento humano esteve presente neste estudo.



Figura 17 - Pessoa em pé sobre o sistema estrutural (BROWNJOHN, 1999)

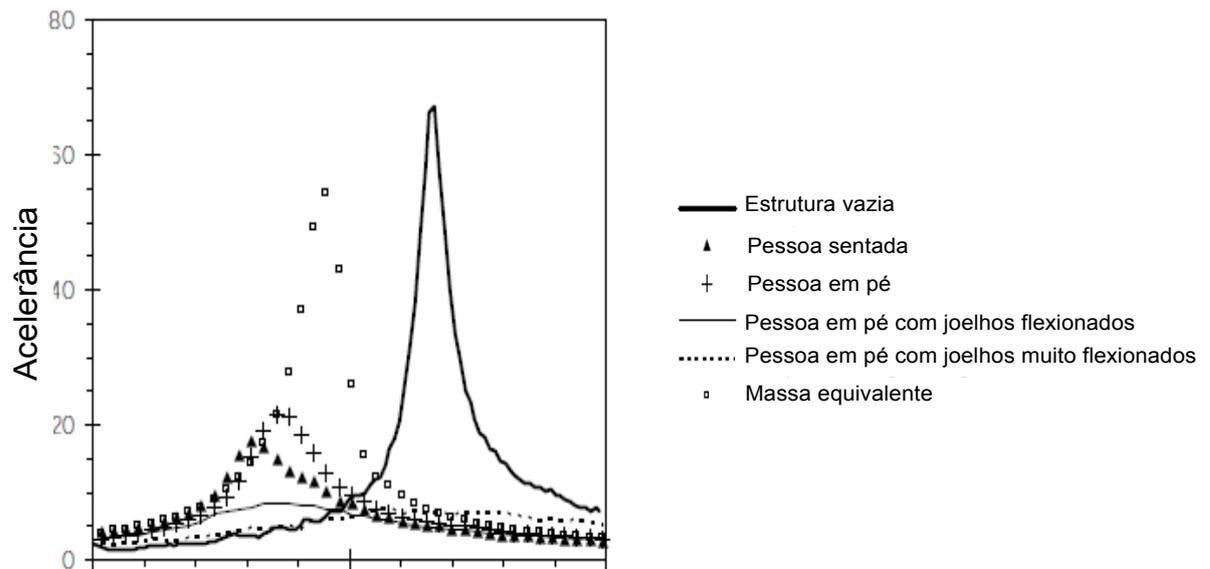


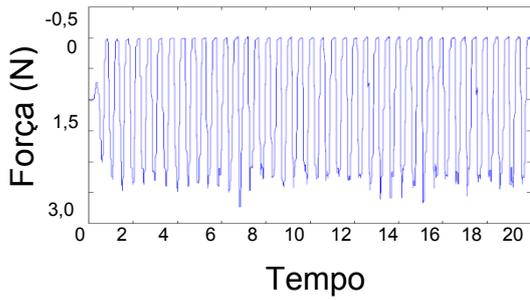
Figura 18 - FRFs da estrutura vazia e ocupada (BROWNJOHN, 1999)

Falati (1999) realizou estudos com base em uma estrutura de concreto (16000 kg) ocupada por uma e duas pessoas. Duas configurações foram usadas para essa estrutura; tais como, as frequências naturais foram 8,02 e 10,15 Hz. Este estudo revelou que tanto a frequência natural diminuiu quanto o amortecimento aumentou para ambas as estruturas ocupadas (Tabela 5). Essas conclusões são consistentes com a observação de Brownjohn (1999).

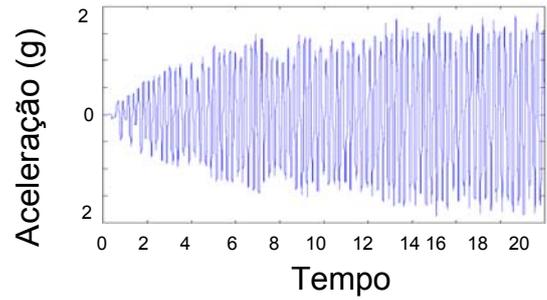
Tabela 5 - Influência da ocupação humana sobre a frequência natural e amortecimento estrutural (FALATI, 1999)

Configuração	Frequência natural (Hz)	Taxa de amortecimento (%)
Estrutura vazia	10,15	1,25
1 pessoa	9,96	3,11
2 pessoas	9,96	3,46
Massa equivalente de 1 pessoa	9,93	1,28
Massa equivalente de 2 pessoas	9,81	1,28

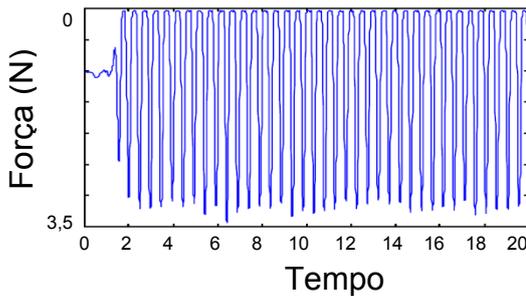
Yao et al. (2002) mediram a força exercida sobre uma plataforma flexível com diferentes frequências naturais [4 e 6 Hz], submetida a saltos sob a frequência de 2 Hz. Os resultados experimentais demonstraram tanto um aumento da força, quanto diminuição da aceleração aplicada na plataforma quando a mesma torna-se mais rígida. A Figura 19 ilustra a resposta estrutural. Posteriormente, Yao et al. (2006) realizaram outros ensaios, desta vez, considerando a execução de saltos sob uma frequência de 2 Hz, sobre estruturas móveis e flexíveis com frequências naturais de 2 e 4 Hz, conforma a Figura 20. Similarmente ao trabalho anterior, foram obtidas as mesmas conclusões, bem como nota-se que ao igualar a frequência da plataforma e da atividade rítmica [Figura 20], medem-se elevadas acelerações na plataforma, assim ocasionando vibrações excessivas e desconforto humano, devido o fenômeno da ressonância.



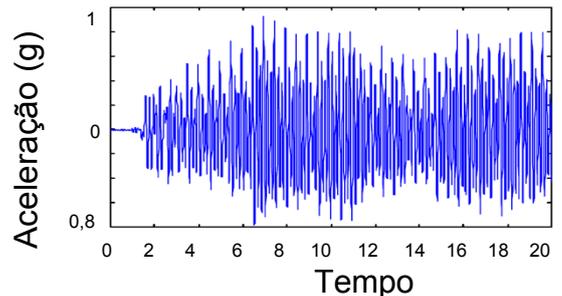
a) Força da plataforma com frequência de 4 Hz



b) Aceleração da plataforma com frequência de 4 Hz

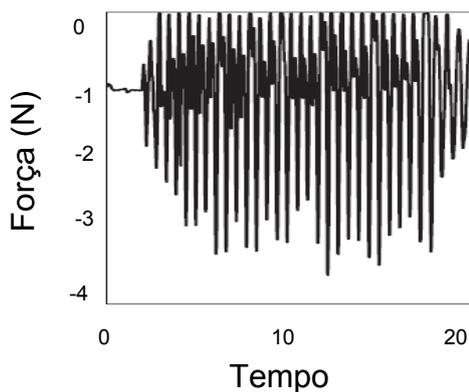


c) Força da plataforma com frequência de 6 Hz

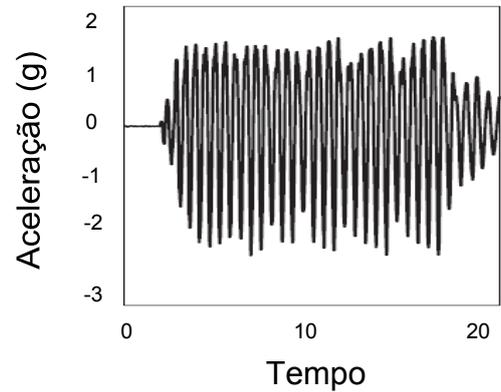


d) Aceleração da plataforma com frequência de 6 Hz

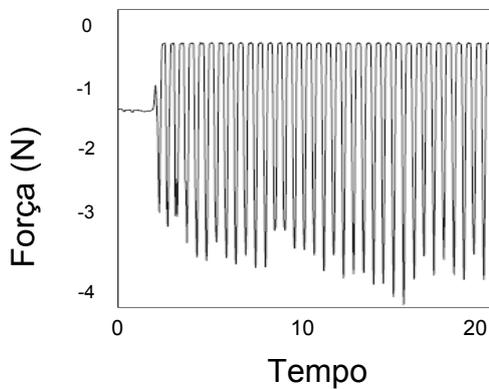
Figura 19 - Resposta dinâmica da plataforma aos saltos de 2 Hz (YAO ET AL, 2002)



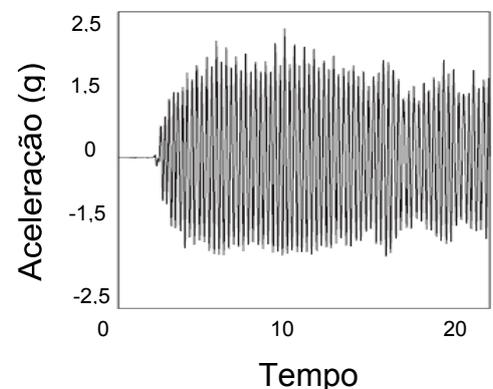
a) Força da plataforma com frequência de 2 Hz



b) Aceleração da plataforma com frequência de 2 Hz



c) Força da plataforma com frequência de 4 Hz

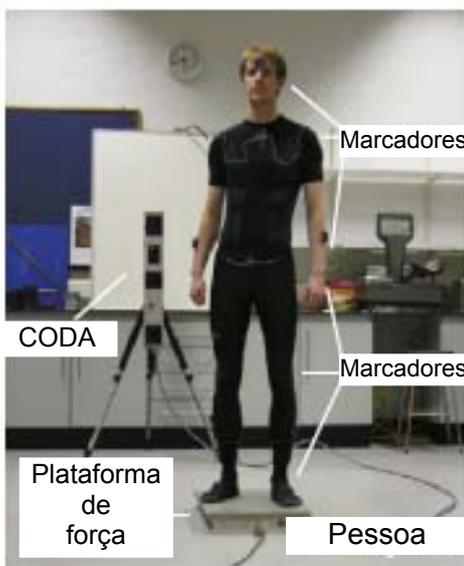


d) Aceleração da plataforma com frequência de 4 Hz

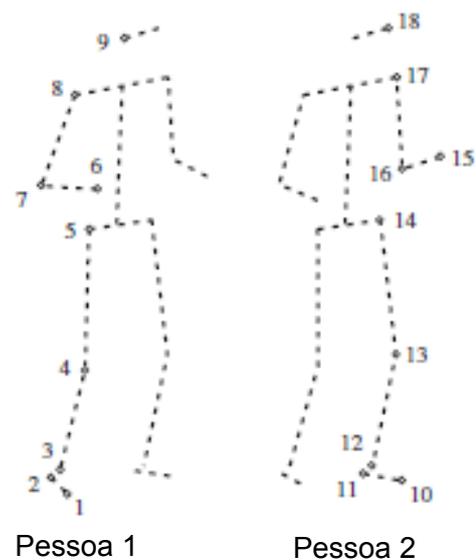
Figura 20 - Resposta da plataforma aos saltos de 2 Hz (YAO ET AL, 2006)

Hanagan (2005) analisou casos reais, tais como escritórios, salas de aula e espaços comerciais; onde foram encontrados níveis de vibrações perturbadoras pelo caminhar humano ao redor destes espaços. Diante das tendências construtivas inseridas, verificou-se a influências de elementos arquitetônicos na contribuição ou não no amortecimento estrutural. Segundo o autor, estas avaliações e recomendações relativas à avaliação das vibrações, ainda geram resistência por parte dos proprietários das construções e projetistas. Em consequência disto, o custo de reparo do problema tem-se mostrado muito maior do que aquele na fase de projeto.

Racic, Brownjohn e Pavic (2010) apresentaram um novo método de medição das forças proveniente das atividades humanas rítmicas, através da utilização de equipamentos baseados no rastreamento do movimento do corpo através de câmeras de vídeo especializadas [*visual marker data*], conforme encontra-se na Figura 21b de modo que eventos reais sejam representados com a maior fidelidade possível. Foram realizados testes experimentais, de modo que uma pessoa realizou saltos e balançou sobre uma plataforma, mediante estímulo de um metrônomo sincronizado a diferentes três frequências (2 Hz; 2.2 Hz e 2.5 Hz). Os resultados apresentados na Figura 22, demonstraram que as maiores amplitudes da força foram encontradas sob a frequência da atividade [ $f=2,2$  Hz] correspondente ao harmônico da frequência fundamental da plataforma [ $f=4,4$  Hz].

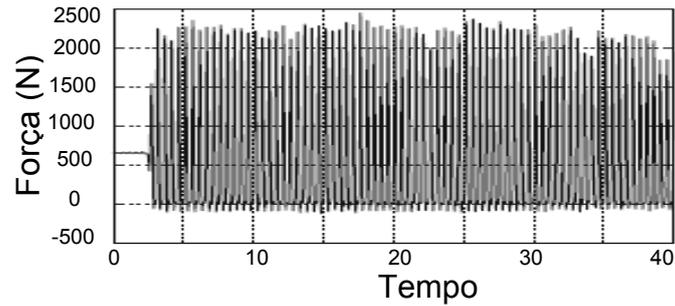


a) Pessoa em pé

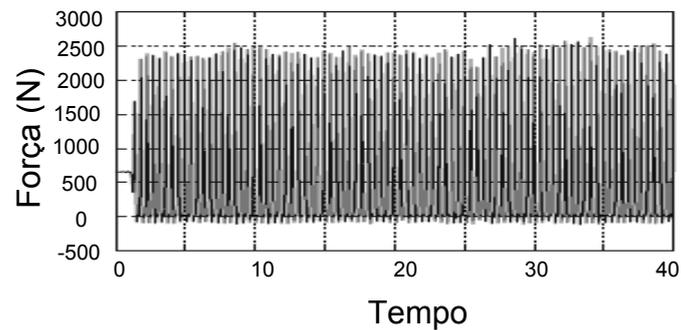


b) Marcação no corpo humano

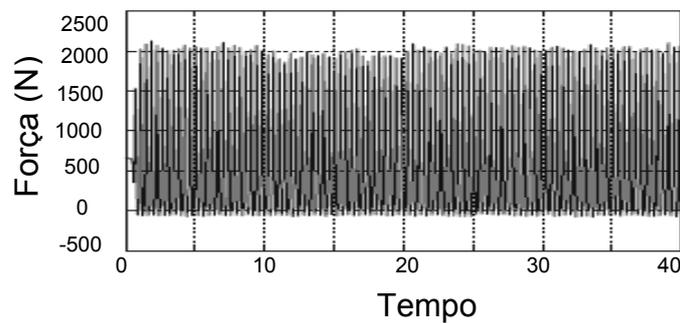
Figura 21 - Pessoa sobre a plataforma instrumentada (RACIC; BROWNJOHN; PAVIC, 2010)



a) Saltos a 2 Hz



b) Saltos a 2,20 Hz



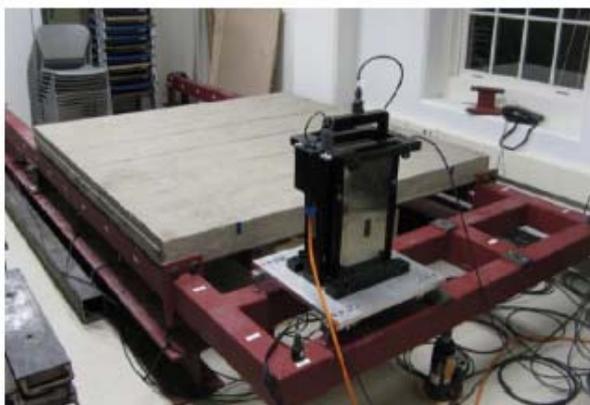
c) Saltos a 2,50 Hz

Figura 22 - Resposta dinâmica da plataforma instrumentada (RACIC; BROWNJOHN; PAVIC, 2010)

Salyards e Firman III (2011) investigaram o efeito das características das multidões nas propriedades dinâmicas de uma estrutura de concreto ocupada. A laje de concreto com uma massa de 3960 kg e uma frequência natural de 6,7 Hz foi investigada a fim de verificar os efeitos das diferentes posturas (joelhos em pé, flexionados e indivíduos sentados) do ser humano. Os resultados demonstraram que o aumento da multidão resultou na diminuição da frequência natural da estrutura para 6,61 e 4,46 Hz, respectivamente, para indivíduos em pé. Essa tendência

também apareceu para o caso sentado, mas não quando os ocupantes flexionaram os joelhos, onde as frequências naturais permaneceram quase iguais. O amortecimento estrutural foi aumentado visivelmente quando a relação de massa foi superior a 0,02 para todas as posturas. Os valores máximos das razões de amortecimento foram obtidos para postura em pé; enquanto o mínimo foi alcançado para a postura dos joelhos flexionados.

Salyards e Noss (2014) realizaram um extenso estudo sobre uma estrutura de teste de cantilever para explorar a interação humano-estrutura (Figura 23). Neste estudo, diferentes valores de frequência natural da estrutura (variando de 4,21 Hz a 8,05 Hz) e diferentes proporções de massa (variando de 0,167 a 0,564) foram considerados. Os ocupantes tiveram diferentes posturas no teste. Foi demonstrado que os ocupantes reduziram a frequência natural da estrutura flexível (4,21 Hz), mas, curiosamente, a redução na frequência natural da estrutura foi quase a mesma para todas as posturas. Para uma frequência natural mais alta (6,27 Hz), foi apresentado um modo adicional de vibração devido aos ocupantes humanos. Nessa estrutura, os ocupantes em pé com os joelhos retos diminuíram a frequência natural da estrutura de forma mais significativa que as outras posturas e houve diferença significativa entre a influência dos ocupantes em pé e a massa adicionada equivalente. A frequência natural da estrutura aumentou ligeiramente quando os sujeitos em pé tinham os joelhos flexionados. Por fim, para maiores frequências naturais da estrutura, este estudo concordou com o trabalho de Ellis e Ji (1997), onde todas as posturas aumentaram ligeiramente a frequência natural da estrutura. Em relação ao amortecimento da estrutura, os experimentos mostraram que os humanos em pé com os joelhos flexionados amorteciam a estrutura mais significativamente do que os humanos em pé com os joelhos retos. Para uma estrutura mais rígida, essa questão foi invertida. Além disso, o aumento da razão de multidão (a massa de ocupantes sobre a massa da estrutura) diminuiu ligeiramente a frequência natural da estrutura ocupada, enquanto não havia uma tendência clara para a razão de amortecimento.



a) Estrutura vazia



b) Estrutura Ocupada

Figura 23 - Estrutura monitorada durante os ensaios (SALYARDS; NOSS, 2014)

Lee et al. (2014) investigaram uma vibração atípica ocorrida nos andares superiores de um edifício de 39 andares na Coreia conforme observa-se na Figura 24. Neste estudo, simularam as excitações humanas rítmicas no centro do 12º andar, tanto nos testes experimentais quanto no modelo obtido via elementos finitos, com a intenção de comparar as frequências naturais e acelerações verticais. Logo, verificou-se que os resultados comparados convergiram a uma frequência natural de 2,7Hz e fator de amortecimento igual a 0,3%, o qual foi facilmente excitado pela prática de atividade rítmica devido à localização de uma academia no décimo segundo andar. Ressalta-se que esta frequência se encontra na mesma faixa correspondente ao primeiro harmônico de atividades rítmicas, apresentando maior contributo energético e tornando-as suscetíveis as vibrações excessivas. Os valores de acelerações de 0,6 a 0,7 m/s<sup>2</sup> encontram-se no limiar dos limites recomendados por normas e guias de projeto

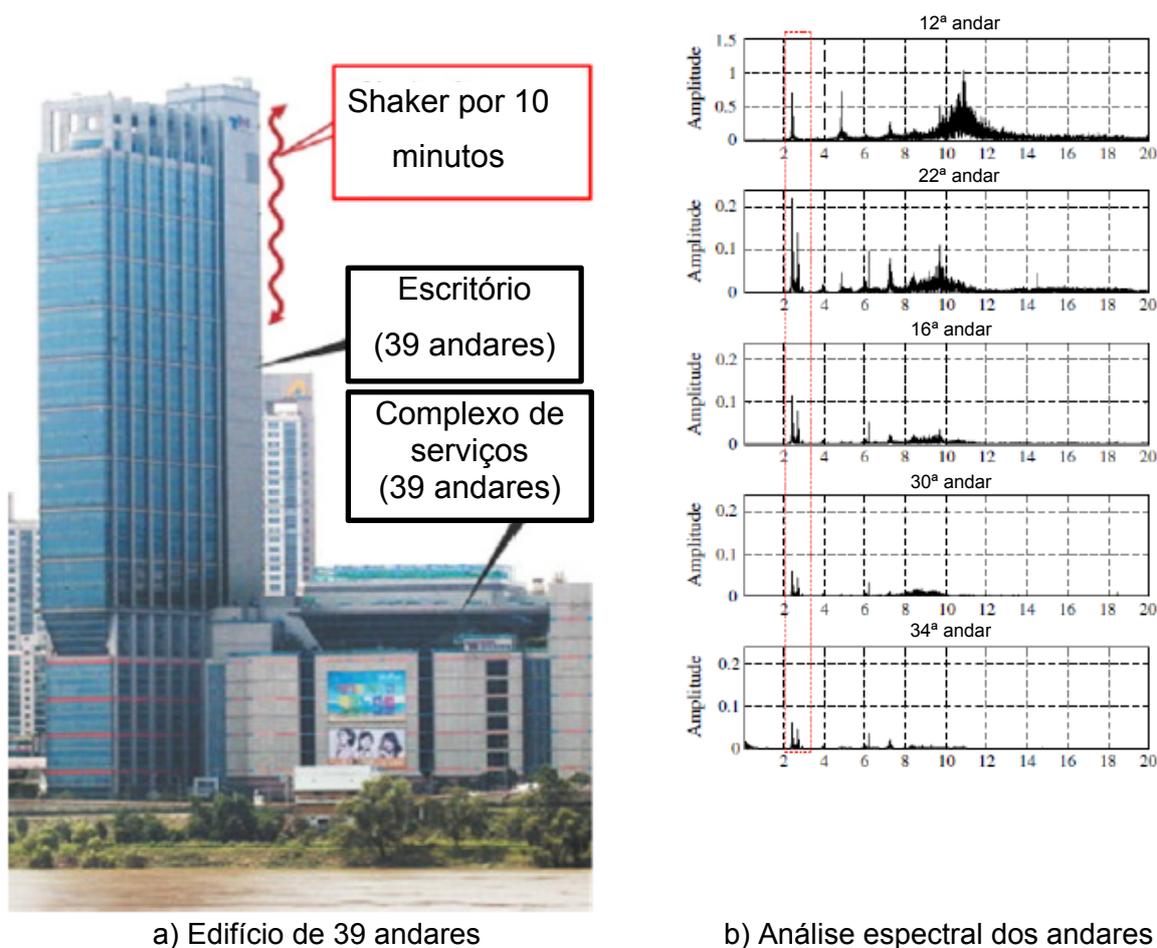


Figura 24 - Ressonância global dos pavimentos (LEE ET ALL, 2014)

Costa-Neves et al. (2014) avaliaram o comportamento de diferentes estruturas mistas, com dimensões variando de 4 m a 10 m, destinada a prática de atividades aeróbicas como ginástica aeróbica e dança. Modelos de carregamento dinâmico foram utilizados para simular a excitação humana rítmica. Além disso, mediante a realização de uma análise modal, as estruturas mistas investigadas apresentaram frequências fundamentais entre 4 e 8Hz, tornando-as suscetíveis a problemas de vibrações excessivas pela ocorrência de atividades humanas. Corroborando tal previsão, 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.

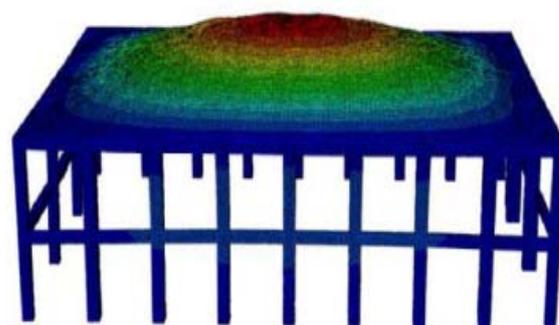
Jin et al. (2014) analisaram as vibrações de um apartamento situado em uma edifício de 33 andares, através do uso de um sistema de aquisição de dados para determinar as características dinâmicas do piso e aceleração proveniente do caminhar na sala de estar. Realizou-se este procedimento devido às vibrações causadas pelo caminhar das outras famílias no pavimento superior. Deste modo,

verificou-se que a frequência natural do piso [ $f=13.1$  Hz] satisfaz os limites recomendados pela norma vigente (JGJ3-2010) [ $f > 5$  Hz], entretanto a aceleração ultrapassou os valores aceitáveis pela norma JGJ3-2010. Neste sentido, as vibrações excessivas podem ser causadas pela pequena fina espessura da laje, reduzindo seu peso próprio e assim comprometendo a rigidez estrutural.

Zhou et al. (2016) realizaram uma investigação (experimental e numérica) de um piso construído de concreto protendido, destinado a prática de Badminton, de acordo com a Figura 25. As frequências e modos experimentais foram obtidos mediante testes com o impacto do calcanhar (*heel-drop test*) e verificou-se que a frequência fundamental do piso igual a 6,17 Hz situa-se abaixo do limite recomendado de normas e guias de projeto para a execução de atividades rítmicas. Deste modo, o piso foi submetido a atividades humanas como o caminhar e saltos, a fim de investigar se as acelerações estavam dentro do limite de conforto humano. Os níveis de vibração encontrados foram satisfatórios de acordo com a percepção dos ocupantes.



a) Vibrações induzidas por saltos



b) Modelo numérico do piso misto

Figura 25 - Avaliação das vibrações do piso de concreto protendido (ZHOU et al.,2016b)

An et al. (2016) avaliaram um piso misto (aço concreto) suportado por cabos – que apresenta ótima capacidade de suporte para vãos longos e maior relação resistência/peso, conforme a Figura 26. Entretanto, o piso – destinado como ginásio – apresenta frequências naturais numa faixa entre 2,3 Hz a 3,06 Hz, bem como um baixo fator de amortecimento, igual a 1,54%. Isto significa que a estrutura analisada está sujeita a vibrações excessivas em relação ao conforto humano.



a) Piso Misto

b) Pessoas saltando

Figura 26 - Piso misto suportado por cabos sob atividades humanas (AN et al.,2016)

Erlina, Priyosulistyo e Saputra (2017) investigaram um piso de concreto protendido utilizado como auditório, devido às queixas de vibrações excessivas durante um concerto de música pop. A partir de ensaios experimentais, conclui-se que a frequência fundamental de 4,39 Hz encontra-se na mesma região dos harmônicos de atividades humanas. Os autores instalaram um sistema passivo de atenuação de vibrações (amortecedor viscoso) de forma a melhorar o conforto humano dos ocupantes, aumentando o amortecimento do piso de 4,58% a 14,51%, conforme a Figura 27.



a) Pessoas dançando

b) Atenuador passivo instalado

Figura 27 - Estrutura sob atividades rítmicas (ERLINA; PRIYOSULISTYO; SAPUTRA, 2017)

He et al. (2017) investigaram a interação homem-estrutura em uma passarela com comprimento de 10,3 m, massa total de 3500 kg e frequência fundamental de 2,83 Hz. Neste estudo, sete relações de massa (0,025 a 0,291) foram selecionadas e consideradas as posturas dos joelhos retos [Figuras 28 a 30]. De acordo com este estudo, a frequência natural fundamental da estrutura foi alterada significativamente devido ao envolvimento humano, visto que a estrutura era relativamente flexível. Por exemplo, 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). No entanto, a taxa de amortecimento da estrutura aumentou drasticamente de 0,42% para 1,44% para as pessoas com os joelhos retos numa razão de massa de 0,291.



Figura 28 - Pessoa com pés levantados durante os testes realizados (HE AT AL, 2017)



Figura 29 - Pessoa com joelhos retos durante os testes realizados (HE AT AL, 2017)



Figura 30 - Pessoa com joelhos flexionados durante os testes realizados (HE AT AL, 2017)

Jonas et al. (2017) avaliaram a resposta dinâmica de um piso flexível e rígido destinado a função de escritório, submetidos a caminhada realizada por uma pessoa sob uma frequência de 2 Hz. Nesse sentido, a aceleração de ambos os pisos foram medidas e posteriormente comparadas. Os resultados demonstraram superioridade das acelerações do piso flexível em relação ao piso rígido, como ilustra a Figura 31. Além disso, observa-se que o piso rígido proporciona menos respostas dinâmicas.

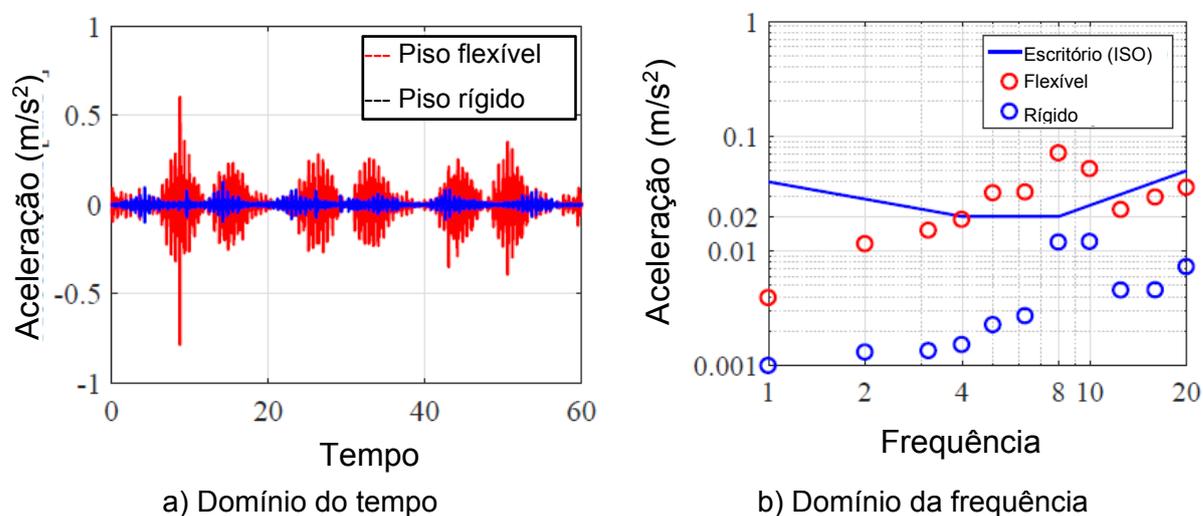


Figura 31 - Aceleração medida durante a caminhada numa frequência de 2,20 Hz (JONES et al., 2017)

Shahabpoor et al. (2017) estudaram os efeitos das pessoas paradas e caminhando sobre as propriedades modais da estrutural. Os testes experimentais foram realizados com 3, 6 e 10 pessoas paradas sobre a estrutural. A análise modal experimental demonstrou que a frequência natural 4,44 Hz (estrutura vazia) reduziu para 4,175 Hz na estrutura ocupada por 10 pessoas [ver Figura 32]. Além disso,

observou-se um aumento da taxa de amortecimento de 0,60% para 2,60% ao considerar a presença de 10 pessoas.

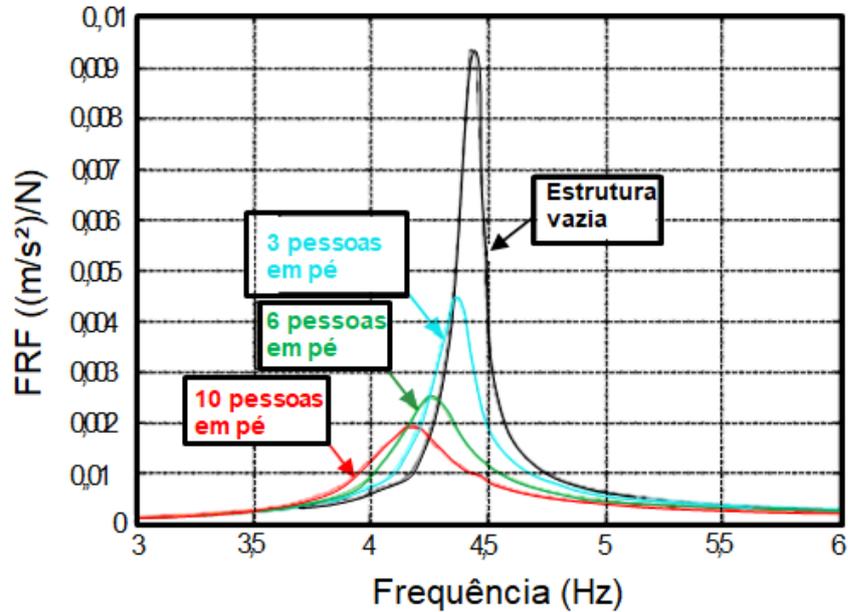


Figura 32 - FRF da estrutura ocupada com diferentes números de pessoas

Gaspar (2018) realizou ensaios experimentais sobre uma plataforma rígida e flexível, apoiadas sobre células de carga com o intuito de determinar os sinais da força dos saltos, conforme a ilustração da Figura 33. Essas plataformas foram submetidas a saltos realizados sob quatro frequências diferentes [1,89 Hz, 2 Hz, 2,27 Hz e 2,86 Hz]. Em relação aos valores de pico ( $F_p$ ) da força medida, a redução foi maior para as frequências de 1,89 Hz e 2,00 Hz (28% e 25%, respectivamente), as quais possuem o 2º harmônico próximo à frequência fundamental da estrutura ( $f=3,84$  Hz), conforme análise da

Tabela 6. Já para frequências fora de ressonância (2,27 Hz e 2,86 Hz), as reduções foram de 18% e 13%, respectivamente [ver

Tabela 6]. A Tabela 7 apresenta os resultados dos testes realizados, e conseqüentemente percebe-se que, há uma redução nas forças geradas pelo indivíduo no piso flexível em nível de comparação com o piso rígido.



a) Saltos na superfície rígida



b) Saltos na superfície flexível

Figura 33 - Saltos realizados sobre uma plataforma (GASPAR, 2018)

Tabela 6 - Força dura gerada pela pessoa. Plataforma de força (GASPAR, 2018)

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

Tabela 7 - Deslocamentos, velocidades e acelerações das pessoas (GASPAR, 2018)

Atividade rítmica	Piso 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)
1,89 Hz (113bpm)	$a_p=60,81$ $a_{RMS}=19,13$ $a_m=50,56$ $\pm 5,42$	$v_p=2,35$ $v_{RMS}=1,24$ $v_m=2,02$ $\pm 0,12$	$d_p=0,137$ $d_{RMS}=0,097$ $d_m=0,115$ $\pm 0,008$	$a_p=16,76$ $a_{RMS}=3,43$ $a_m=9,11$ $\pm 2,87$	$v_p=0,74$ $v_{RMS}=0,20$ $v_m=0,30$ $\pm 0,13$	$d_p=0,071$ $d_{RMS}=0,024$ $d_m=0,021$ $\pm 0,012$
2,00 Hz (120bpm)	$a_p=69,30$ $a_{RMS}=21,12$ $a_m=58,10$ $\pm 5,68$	$v_p=2,34$ $v_{RMS}=1,24$ $v_m=2,04$ $\pm 0,11$	$d_p=0,123$ $d_{RMS}=0,090$ $d_m=0,105$ $\pm 0,007$	$a_p=39,82$ $a_{RMS}=15,38$ $a_m=33,94$ $\pm 3,01$	$v_p=1,88$ $v_{RMS}=1,07$ $v_m=1,66$ $\pm 0,10$	$d_p=0,120$ $d_{RMS}=0,082$ $d_m=0,100$ $\pm 0,008$
2,27 Hz (136bpm)	$a_p=76,04$ $a_{RMS}=22,26$ $a_m=65,20$ $\pm 5,12$	$v_p=2,09$ $v_{RMS}=1,13$ $v_m=1,76$ $\pm 0,10$	$d_p=0,116$ $d_{RMS}=0,073$ $d_m=0,088$ $\pm 0,007$	$a_p=48,38$ $a_{RMS}=16,55$ $a_m=41,52$ $\pm 2,29$	$v_p=2,00$ $v_{RMS}=0,98$ $v_m=1,57$ $\pm 0,11$	$d_p=0,114$ $d_{RMS}=0,067$ $d_m=0,080$ $\pm 0,012$
2,86 Hz (172bpm)	$a_p=71,90$ $a_{RMS}=21,84$ $a_m=60,44$ $\pm 4,08$	$v_p=1,58$ $v_{RMS}=0,93$ $v_m=1,35$ $\pm 0,08$	$d_p=0,096$ $d_{RMS}=0,049$ $d_m=0,061$ $\pm 0,006$	$a_p=44,46$ $a_{RMS}=16,27$ $a_m=40,89$ $\pm 1,47$	$v_p=1,38$ $v_{RMS}=0,79$ $v_m=1,11$ $\pm 0,08$	$d_p=0,085$ $d_{RMS}=0,043$ $d_m=0,054$ $\pm 0,009$
<p>Notas: <math>a_p</math>, <math>v_p</math>, e <math>d_p</math> referem-se aos valores máximos (positivos) dos sinais de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente.</p> <p><math>a_m</math>, <math>v_m</math>, e <math>d_m</math> referem-se aos valores médios dos máximos (positivos) dos sinais de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente, seguidos de seus respectivos desvios-padrão.</p>						

### 1.5 Critérios de conforto humano

Este capítulo apresenta critérios e normas de projeto, de modo a oferecer orientação na elaboração de projetos relacionados ao conforto humano, sob o ponto de vista da prática de atividades humanas rítmicas. As normas apresentadas são diferenciadas pelo nível de refinamento a percepção humana as vibrações. Tal situação conduz tanto a avaliações conservadoras quanto a não conservadoras.

### 1.5.1 Norma NBR 8800 (2008)

A norma determina os requisitos básicos em que se devem respeitar os projetos de estruturas de aço e mistas de aço e concreto de edificações. Em relação a verificação do estado limite de serviço referente as vibrações de pisos, o item 11.4.1 estabelece o dimensionamento da estrutura, tais como grandes áreas que não possuem divisórias ou outros elementos de amortecimento, de modo a se evitar o aparecimento de vibrações transientes indesejáveis pelo caminhar humano e outras fontes, conforme o anexo L (NBR 8800, 2008, p.110).

Referente ao item 11.4.2, relacionado aos equipamentos mecânicos que possam produzir vibrações indesejáveis são recomendados o isolamento para reduzir ou eliminar tais vibrações na estrutura. Esses tipos de vibrações, que incluem veículos e atividades humanas rítmicas como dança, devem ser verificados também em relação aos estados-limites últimos (ELU), incluindo fadiga. O anexo K e L pertencentes a este item descrevem respectivamente as verificações de fadiga e estado-limite de serviço (ELS) devido a tais vibrações.

Segundo o anexo L, item L.1.2 (NBR 8800, 2008), estabeleceu-se que a frequência natural da estrutura deve ser superior a 3Hz. De acordo com o item L.2, os projetos estruturais devem avaliar os problemas de vibrações de pisos por meio da realização de uma análise dinâmica, levando em conta as características e a natureza das excitações dinâmicas, por exemplo, o caminhar humano e atividades rítmicas; os critérios de aceitação para o conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso; a frequência natural fundamental da estrutura do piso; a razão de amortecimento modal; os pesos efetivos do piso. Este item recomenda a avaliação mais precisa utilizando os procedimentos e métodos contidos nas bibliografias no item S.4 (NBR 8800, 2008, p. 236).

O item citado anteriormente pela norma recomendou análises mais criteriosas, entretanto, no item L.3 estabeleceu uma “avaliação simplificada para atividades humanas normais”, no qual a NBR 8800 afirma que “a opção por este tipo de avaliação fica a critério do projetista e pode não constituir uma solução adequada

para o problema.” (NBR 8800, 2008, p.161). Deste modo, foram desenvolvidas duas regras para esta avaliação, descritas nos itens L.3.2 e L.3.3.

Em relação ao item L.3.2, estruturas destinadas ao caminhar humano constante, como residência e escritório, a frequência natural não deve ser inferior a 4Hz e deslocamento vertical do piso causado pelas ações permanentes e variáveis abaixo de 20 mm.

Em pisos onde as pessoas saltam ou dançam de forma rítmica, como os de academias de ginástica, salões de dança, ginásios e estádios de esportes, o item L.3.3 especifica que a menor frequência natural não pode ser inferior a 6Hz e em casos em que atividade seja muito repetitiva, como a ginástica aeróbica, a frequência natural deverá ser aumentada para 8Hz. Essas condições ficam satisfeitas, se o deslocamento vertical total causado pelas ações permanentes, excluindo a parcela dependente do tempo, e variáveis, considerando a viga como biapoiada e usando as combinações frequentes de serviço, respectivamente não ultrapassarem 9 mm e 5 mm.

#### 1.5.2 Norma NBR 6118 (2014)

Esta norma estabelece os requisitos básicos que são exigidos em projetos de estrutura de concreto simples, armado e protendido, excluindo os que empregam concreto leve, pesado ou outros especiais.

A verificação do estado limite nesta norma é baseada no item 13.3.2 (NBR 6118, 2014, p. 69), avaliando os limites estabelecidos de deslocamento da estrutura mediante os valores práticos contidos na tabela 13.2 (NBR 6118, 2014, p. 70). Esta tabela indica valores relacionados a quatro tipos de efeito a analisar, onde o utilizado será referente à aceitabilidade sensorial em relação a vibrações de pisos. De acordo com a tabela referida, o deslocamento estático limite é considerado a  $L/350$ , onde “L” é o menor vão do piso, e o deslocamento estático considerado é aquele devido à parcela de cargas acidentais.

A análise das vibrações excessivas pelo item 23.3 é realizada em regime linear no caso de estruturas usuais. Com o intuito de evitá-las, e assim garantir um

comportamento satisfatório das estruturas sujeitas à vibração, é necessário o maior afastamento possível da frequência natural da estrutura ( $f_n$ ) da frequência crítica ( $f_{crítica}$ ). A equação (13) representa a relação da frequência natural da estrutura ( $f_n$ ) e crítica ( $f_{crítica}$ ).

$$f_n \geq 1,2 f_{crítica} \quad (13)$$

A equação (13) é analisada de forma que, afastando a frequência natural da estrutura da frequência crítica busca-se evitar o fenômeno da ressonância entre a estrutura e a ação dinâmica atuante e, conseqüentemente minimizar o desconforto humano devido às vibrações excessivas. De modo a reduzir tais vibrações são realizadas ações sobre a estrutura como aumento de rigidez e massa para modificar a frequência natural e também elevar a taxa de amortecimento estrutural (NBR 6118, 2014, p. 172). Na falta de valores determinados experimentalmente, adota-se os valores indicados na Tabela 8 para a  $f_{crítica}$ .

Em estruturas onde as recomendações anteriores não possam ser atendidas, deve ser realizada uma análise dinâmica mais meticulosa utilizando as normas internacionais, caso não exista norma brasileira específica.

Tabela 8 - Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas (NBR 6118, 2014, p. 173)

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	1,6 a 4,5

Conforme Varela (2004), uma análise baseada somente em frequências mínimas não é aconselhável, pois a estrutura em casos fora de ressonância pode apresentar vibrações indesejáveis com a força dinâmica atuante.

### 1.5.3 Norma ISO 10137 (2007)

A norma ISO 10137 (2007) da International Organization for Standardization fornece recomendações para a avaliação das vibrações de edifícios e passarelas, abrangendo a recepção destas vibrações a ocupação humana em edifícios e passarelas e também o conteúdo e estrutura da edificação.

A avaliação das vibrações, segundo o item 4.1 (ISO 10137, 2007, p. 4), leva-se em conta as características da fonte de vibração, o caminho transmissor e o receptor. De forma que as vibrações percorrem um trajeto denominado caminho de transmissão até chegar finalmente aos receptores destas vibrações, sendo estes, sujeitos aos critérios do estado limite de serviço (ELS).

De acordo com o item 4.2.1 (ISO 10137, 2007, p. 5), a excitação humana representa uma fonte de vibração no interior da edificação. Além disso, as atividades humanas rítmicas são classificadas de classe A no item 6.2.1 (ISO 10137, 2007, p. 9), da norma, na qual atuam como fonte de vibração no tempo e espaço.

O anexo C descreve os critérios de vibração relativos à resposta humana, onde comenta a influência de inúmeros fatores, tais como as características do indivíduo, atividade exercida e expectativa do indivíduo às vibrações, na aceitabilidade aos níveis de vibração.

Segundo o item C.1.1.2 (ISO 10137, 2007, p. 33), as vibrações são analisadas usualmente pela aceleração, entretanto, a percepção a diferentes níveis de intensidade ocorre também pela frequência do movimento e posicionamento do indivíduo (em pé, sentado ou deitado), portanto é necessário que as acelerações sejam filtradas. Esses filtros ou parâmetros de ponderação de frequência são apresentados na ISO 2631-1 (1997) para situações em que a direção da vibração crítica é especificada ou utiliza-se a ISO 2631-2 (2007) quando o sentido crítico é desconhecido. A norma ISO 2631-2 (2003) não oferece uma orientação sobre os critérios de aceitação, entretanto a ISO 2631-2 (1989) permite a utilização de parte relevantes desta edição para serem utilizados como critérios para vibrações em edifícios, sendo assim, reproduzidas em um formato no anexo C da ISO 10137 (2007). É importante ressaltar que a faixa de frequência coberta é de 1 a 80 Hz. A Figura 34 representa o posicionamento do indivíduo diante das vibrações.

O valor limite da aceleração (RMS) é determinado pela multiplicação dos coeficientes fornecidos na Tabela 9, em função da destinação da estrutura, do período do dia e do tipo de vibração, pelos valores das curvas-base (Figuras 35 a Figura 37), em função da direção das acelerações.

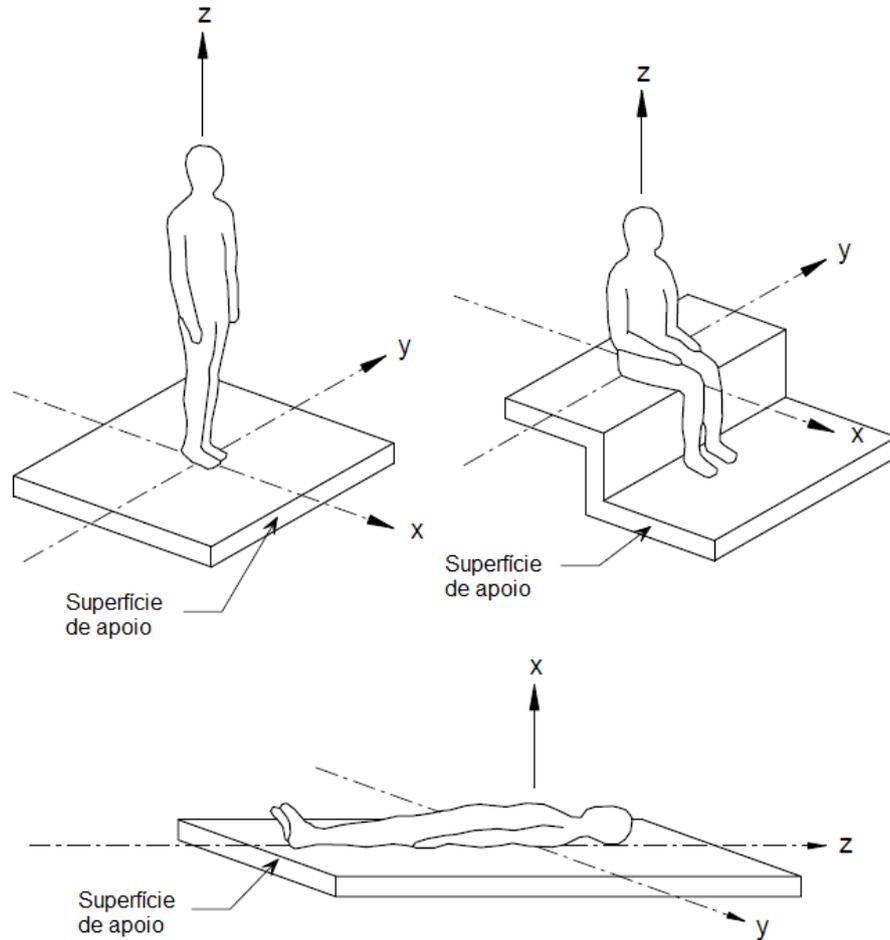


Figura 34 - Direções das vibrações (ISO 2631-1, 1997)

A aceleração da aceleração RMS ponderada (the weighted RMS acceleration) é calculada pela equação (14), conforme a ISO 2631-1 (1997):

$$a_w = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (14)$$

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

Tabela 9 - Faixas dos fatores de multiplicação usados em muitos países para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios com respeito à resposta humana (ISO 10137, 2007, p. 34)

Local	Tempo	Fatores de multiplicação para a curva base ( Figura 35, Figura 36 e Figura 37) <sup>(a)</sup>	
		Vibração contínua e intermitente <sup>(b)</sup>	Vibrações por excitação transiente com várias ocorrências ao dia
Áreas de trabalho críticas (salas de operação de hospitais, laboratórios de precisão, etc.)	Dia	1	1
	Noite	1	1 <sup>(c)</sup>
Residências (apartamentos, casas e hospitais)	Dia	2 a 4 <sup>(d)</sup>	30 a 90 <sup>(d), (e), (f)</sup>
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios "silenciosos" (calmos)	Dia	2	60 a 128 <sup>(g)</sup>
	Noite	2	60 a 128
Escritórios em geral (escolas, etc.)	Dia	4	60 a 128 <sup>(g)</sup>
	Noite	4	60 a 128
Salões de conferências e oficinas	Dia	8	90 a 128 <sup>(g)</sup>
	Noite	8	90 a 128

NOTA 1: Para avaliar os efeitos de um sinal de vibração contendo dois ou mais componentes de frequência discretos, o método do valor médio a quarta potência (*the root-mean-quad; (rmq)*) pode ser empregado (ver ISO 2631-2:1989, Anexo B)

NOTA 2: Esta tabela foi adaptada a partir da ISO 2631-2:1989, Anexo A.

(a) Esses fatores levam a valores de magnitudes de vibração abaixo dos quais a probabilidade de comentários adversos é baixa (qualquer ruído acústico causado por vibração estrutural não é considerado).

(b) Dobrar as magnitudes de vibração sugeridas pode resultar em comentários adversos, e isto pode aumentar significativamente se as magnitudes forem quadruplicadas (quando disponível, as curvas de dose/resposta podem ser consultadas).

"Vibrações contínuas" são aquelas com uma duração de mais de 30 min por 24 h; "vibrações intermitentes" são aquelas com mais de 10 acontecimentos por 24 h.

(c) Magnitudes de choque impulsivo em salas de operação (hospitais) e áreas críticas de trabalho referem-se a períodos de tempo em que as operações estão em andamento ou o trabalho crítico está sendo realizados. Em outros horários, magnitudes tão elevadas como aquelas para residências são satisfatórias desde que exista devido acordo e aviso.

(d) Em áreas residenciais, existe uma grande variação na tolerância às vibrações. Os valores específicos são dependentes de fatores sociais, culturais e psicológicos.

(e) A relação entre o número de eventos por dia, magnitudes e durações não está bem estabelecida. No caso de detonação (uso de explosivos), e para mais de três eventos por dia, a seguinte relação provisória pode ser usada para modificar os fatores de residências na coluna 4 da tabela. O procedimento envolve uma multiplicação do valor da magnitude da vibração por um fator numérico  $F = 1,7N^{-0,5}T^{-d}$ , onde N é o número de eventos de um dia de 16 h; T é o período de duração do impulso e o sinal de decaimento para um evento, em segundos, (a duração de um evento pode ser estimada a partir dos pontos de movimento/histórico de tempo de 10% (-20dB)); d é zero para T menor que 1 s. Para estímulos de curta duração, há evidências de que a resposta humana para pisos de madeira tenha  $d = 0,32$ , e para pisos de concreto  $d = 1,22$ . Este fator numérico não se aplica quando os valores são inferiores àqueles apresentados para o caso de vibração contínua.

(f) Na escavação de pedras de grande tenacidade, onde perturbações subterrâneas causam vibrações em frequências altas, um fator de até 128 é satisfatório para imóveis residenciais em alguns países. Fatores menores de 60 somente se aplicariam a estruturas frágeis ou áreas sensíveis.

(g) As magnitudes para choques impulsivos em escritórios e oficinas não devem ser aumentadas sem considerar a possibilidade de interrupção significativa da atividade do trabalho.

(h) A ação de vibrações em operários executando certos processos numa oficina mecânica ou industrial deve estar numa categoria separada. A ISO 2631-1 (1997) se aplica melhor a esta categoria.

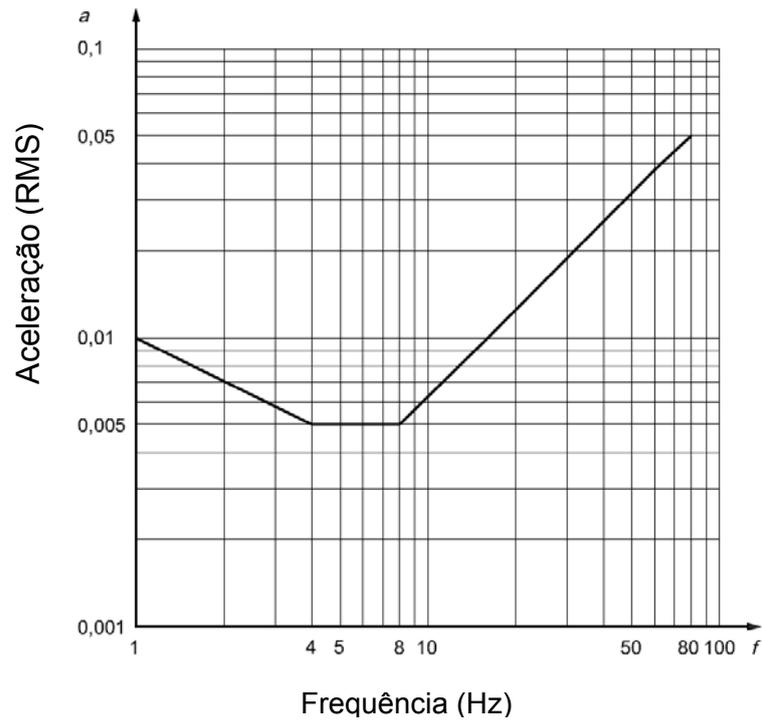


Figura 35 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração no eixo z (ISO 10137, 2007)

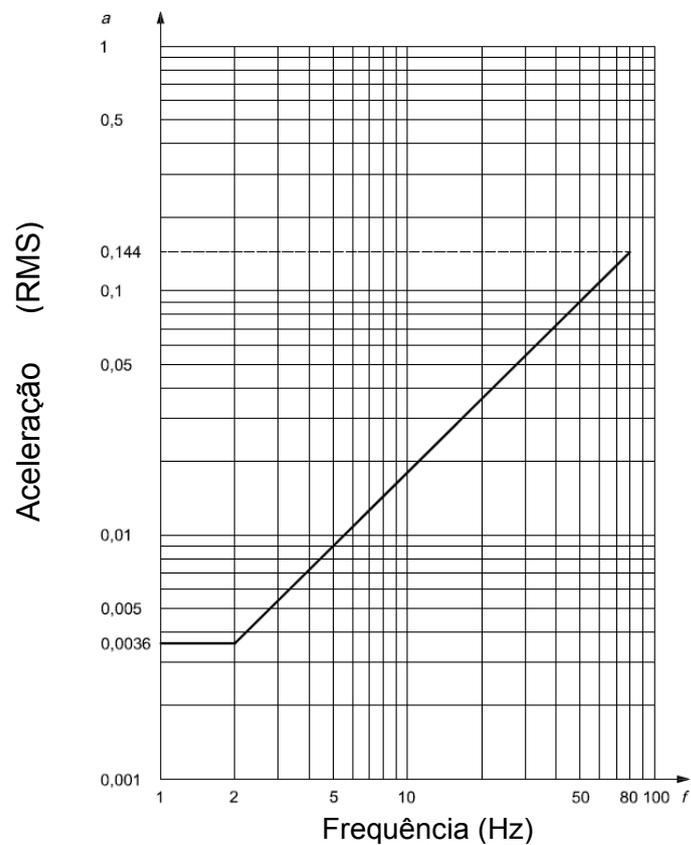


Figura 36 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração nos eixos x e y (ISO 10137, 2007)

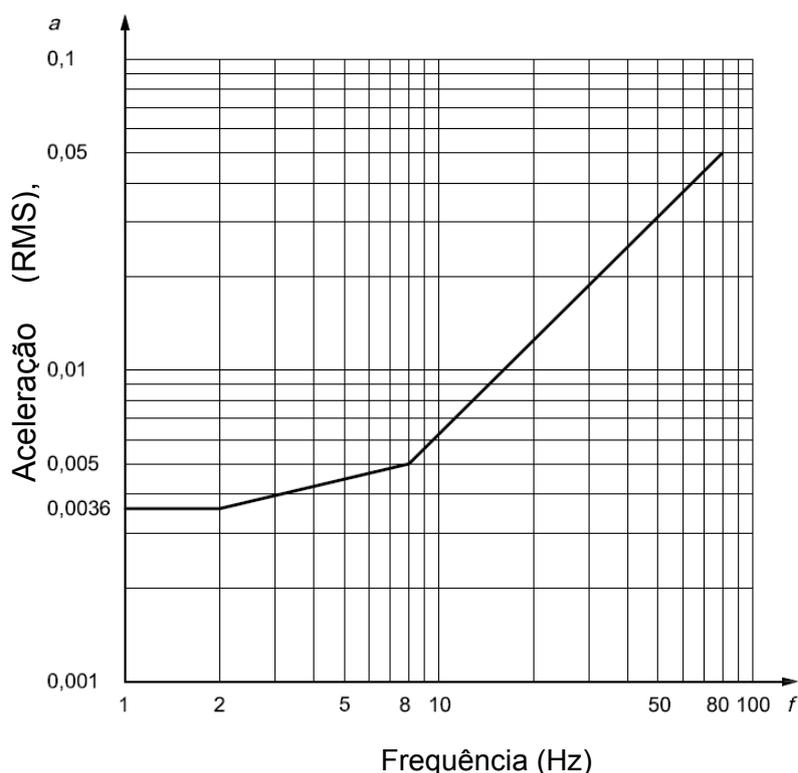


Figura 37 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração em direção combinada nos eixos x, y, z (ISO 10137, 2007)

A norma estabelece que as acelerações devem ser avaliadas em valores de dose de vibração (*Vibration Dose Values*) – VDV em casos em que a relação entre o valor de pico e o valor RMS exceder mais que seis. A equação (15) apresenta a aceleração VDV, conforme a ISO 2631-1 (1997).

$$VDV = \left[ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right]^{1/4} \quad (15)$$

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

Embora os valores de dose de vibração (VDV) não sejam ainda usados amplamente, eles têm sido empregados em alguns países quando a relação entre o valor de pico e o valor RMS ultrapassar seis (ISO 10137, 2007). Na Tabela 10 estão representados os valores limites de VDV em função do grau de sensibilidade e local investigado.

Tabela 10 - Valores de dose de vibração ( $m/s^{1.75}$ ) acima dos quais vários níveis de comentários adversos podem ser esperados em edifícios residenciais (ISO 10137, 2007, p. 35).

Local	Baixa probabilidade de comentários adversos	Possíveis comentários adversos	Prováveis comentários adversos
Edifícios residenciais 16 horas diurnas	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 1,6
Edifícios residenciais 8 horas noturnas	0,13	0,26	0,51

É necessário ressaltar que, os fatores de multiplicação fornecidos na Tabela 9 são aplicáveis também no caso da avaliação de vibrações em VDV.

O item C.2.3 considera que a avaliação dos efeitos das vibrações pelas pessoas varia conforme o movimento realizado, logo a percepção de uma pessoa parada e outra se movimentando é diferenciada. Avaliam-se estas vibrações considerando dois critérios, sendo o primeiro pelas pessoas paradas em meio a um público, onde o limite de vibração vertical na ausência de informações é obtido na Figura 3 com um fator de multiplicação de 200. O segundo critério é a segurança do público em geral, de forma a prevenir casos extremos de vibração que possam gerar pânico, onde o limite considerado é um fator de multiplicação de até 400 para ser aplicado nas curvas básicas das Figuras 36 a 38.

Em relação a resposta dinâmica de pisos submetidos a atividades humanas rítmicas, a ISO 10137 (2007) recomenda a avaliação proposta por Guia prático do AISC (Murray et al., 2016) e Wyatt (1989).

#### 1.5.4 Norma Inglesa BS 6472-1 (2008)

Esta norma fornece um guia para avaliar a exposição humana a vibrações em edifícios. É importante ressaltar, que a norma ISO 10137 (2007) também considera a atuação de diversos fatores que interferem na percepção humana as vibrações. Tais fatores a ser avaliados são: atividade exercida na estrutura, fatores sociais e

culturais, além da frequência e a direção da vibração. Pela norma, tais vibrações podem ser classificadas em contínuas, intermitentes e ocasionais. Observa-se no item 3.2.1 da BS 6472-1 (2008) que a faixa de frequência considerada varia de 0,5 Hz a 80Hz.

Baseado nos fatores que influenciam na percepção dos indivíduos as vibrações, devem-se filtrar as acelerações através dos coeficientes de ponderação (“W<sub>b</sub>” para acelerações verticais e “W<sub>d</sub>” para acelerações horizontais) nesta norma e, adicionalmente, na norma BS 6841 (1987). De acordo com o item 3.2.2 da BS 6472-1 (2008), a sensibilidade do indivíduo a vibração vertical é mais perceptível na faixa de frequência de 4 a 12,5Hz, bem como na vibração horizontal atua na frequência de 1 a 2Hz.

O limite de percepção da vibração contínua pelos indivíduos é variável, de tal forma que estudos apontam que metade das pessoas de uma típica população pode perceber uma aceleração de pico de 0,015 m/s<sup>2</sup> quando estão sentadas ou em pé. Um quarto dessa população pode perceber um valor de 0,01 m/s<sup>2</sup>, e o último quarto da população percebe um valor de 0,02 m/s<sup>2</sup>. Tais limites podem ser ligeiramente maiores quando as vibrações tem um período de duração menor que 1s.

Em relação aos efeitos das vibrações dos edifícios sobre um indivíduo, a norma estabelece a utilização dos valores de dose de vibração (VDV) para melhor avaliação de tais efeitos. Tal método conduz a uma avaliação consistente de vibrações contínuas, intermitentes, ocasionais e impulsivas e se correlaciona bem com as respostas subjetivas. O valor de dose de vibração (VDV) é representado pela equação (16), conforme a BS 6472-1 (2008).

$$VDV_{b/d, dia/noite} = \left[ \int_0^T a^4(t) dt \right]^{0,25} \quad (16)$$

Onde:

VDV<sub>b/d, dia/noite</sub> é o valor de dose de vibração (em m/s<sup>1,75</sup>), sendo que o subscrito “dia/noite” refere-se ao período de 16 horas para o dia (por exemplo, das 7h às 23h) e ao período de 8 horas para a noite (por exemplo, das 23h às 7h);

$a(t)$  é a aceleração ponderada (em  $m/s^2$ ), usando os coeficientes de ponderação “ $W_b$ ” (aceleração vertical) e “ $W_d$ ” (aceleração horizontal) conforme apropriado;

$T$  é o período total de tempo (em s) do dia ou da noite durante o qual a vibração pode ocorrer.

Quando a vibração é constante e com regulares repetições, a medição é realizada utilizando apenas uma amostra representativa, de “ $\tau$ ” segundos. Se o valor de dose de vibração for “ $VDV_{b/d, \tau}$ ”, logo o valor total de dose de vibração para o dia, “ $VDV_{b/d, dia}$ ”, é fornecido pela equação (17):

$$VDV_{b/d, dia} = \frac{t_{day}}{t_{\tau}}^{0,25} \times VDV_{b/d, \tau} \quad (17)$$

É importante ressaltar que o valor de dose de vibração (VDV) tem maior influência da magnitude da vibração do que sua duração.

Onde “ $t_{day}$ ” (em s) é a duração de exposição por dia.

Se, durante qualquer período de avaliação, existir um total de “ $n$ ” episódios de vibração de várias durações ( $t_n$ ), cada um com um valor de dose de vibração de “ $VDV_{b/d, t_n}$ ”, o valor total de dose de vibração para o período do dia ou noite, é dado pela equação (18):

$$VDV_{b/d, dia / noite} = \left( \sum_{n=1}^{n=N} VDV_{b/d, t_n}^4 \right)^{0,25} \quad (18)$$

Em casos de vibração contínua, onde se caracteriza pela amplitude constante e relação entre a aceleração de pico e *RMS* de, aproximadamente, 3 a 6; uma aproximação do valor de dose de vibração pode ser feita, sendo esta denominada de valor de dose de vibração estimado (eVDV), de acordo com a equação (19). A aplicação do eVDV não é recomendado para vibrações com características variáveis ao longo do tempo ou choques (BS 6472-1, 2008, p. 16).

$$eVDV = 1,4 \times a(t)_{rms} \times t^{0,25} \quad (19)$$

No que diz respeito às fontes de vibrações dos pisos, a BS 6472-1 (2008) distingue os pisos de baixa e alta frequência, baseando-se nas respostas dinâmicas e a excitação humana.

Os pisos com frequências naturais menores que a faixa de variação de 7 a 10 Hz são denominados como estrutura de baixa frequência, sendo mais susceptível a ressonância, provenientes de atividades humanas. Quando tais pisos possuem frequências naturais maiores que a faixa de variação de 7 a 10Hz, são considerados como piso de alta frequência. Logo, a probabilidade de serem excitados em ressonância com a atividade humana praticada sobre eles é bem menor.

Na Tabela 11 estão apresentados os valores de dose de vibração (VDV), com a finalidade de avaliar as vibrações baseado no conforto humano.

Tabela 11 - Valores de dose de vibração ( $m/s^{1.75}$ ) que podem resultar na probabilidade de comentários adversos em edifícios residenciais (BS 6472-1, 2008, p. 12)

Local	Baixa probabilidade de comentários adversos <sup>(1)</sup>	Possíveis comentários adversos	Prováveis comentários adversos <sup>(2)</sup>
Edifícios residenciais 16 horas diurnas	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 1,6
Edifícios residenciais 8 horas noturnas	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8

(1) Comentários adversos não são esperados para valores abaixo desses limites.

(2) Comentários adversos são provavelmente esperados para valores acima desses limites.

Em locais como escritórios e oficinas, fatores de multiplicação de 2 a 4, respectivamente, deve ser aplicados nos valores da para 16 horas diurnas.

Os valores apresentados na Tabela 4 representam o melhor julgamento sobre a sensibilidade humana às vibrações e podem ser usados tanto para vibrações horizontais quanto para vibrações verticais, contanto que os valores em VDV sejam corretamente ponderados. Comenta-se na norma que fatores externos, tais como ruídos, estalos e efeitos visuais exercem influência sobre a sensibilidade humana as vibrações. A norma BS 6472-1 (2008) considera que há uma imprecisão da aceitabilidade sensorial dos indivíduos as vibrações, mesmo que se utilizem os melhores métodos de obtenção de tais limites.

### 1.5.5 Guia do SCI (2009)

Este guia fornece orientação para o projeto de pisos submetidos a vibrações, através da publicação P354 concebida pelo The Steel Construction Institute (SCI)

A avaliação das vibrações pela percepção humana é medida em termos de aceleração RMS, visto que melhor representa a vibração ao longo tempo. Os critérios de obtenção da aceleração RMS são os mesmos utilizados pela norma ISO 10137 (2007) e a BS 6472-1 (2008), no qual influem a frequência e direção da vibração. Logo, os coeficientes de ponderação utilizados para filtrar as acelerações são aqueles fornecidos nas normas BS 6841 (1987) e ISO 2631-1 (1997).

No caso de vibrações intermitentes (por exemplo, atividades de caminhada), o guia SCI (2009) recomenda o uso de valores de dose de vibração (VDVs) para a avaliação de vibrações conforme as normas ISO 10137 (2007) e BS 6472 (1992). Em relação ao critério de conforto humano quando atividades rítmicas são praticadas sobre pisos, o guia cita que não há um consenso em relação aos valores limites de aceleração para estas atividades. Em virtude de tal situação, o guia recomenda seguir as orientações fornecidas pelo guia prático do AISC.

### 1.5.6 Guia Prático do AISC (2016)

Este guia foi elaborado pelos pesquisadores Murray, Allen e Ungar (1997), com o objetivo de apresentar os princípios básicos e ferramentas analíticas para a avaliação dos sistemas de pisos e passarelas submetidas às vibrações oriundas de atividades humanas, e também fornecer orientações de medidas corretivas em estruturas com problemas.

O critério de avaliação das estruturas neste guia para baseia-se na aceleração de pico, através da relação  $a_p/g$ . Estes valores são comparados aos limites recomendados pela na curva base da ISO 2631/2 (1989), ilustrada na Figura 38, fornecidos pela norma International Standard Organization, que representa o limite no qual as acelerações verticais passam a ser perceptíveis. Os valores limites

apresentados podem variar numa faixa de 0,8 a 1,5 vezes dos valores recomendados de acordo com a duração e a frequência da vibração (AISC, 2003).

Este guia considera que apenas uma componente harmônica, em função do tempo, seja coincidente com a frequência natural da estrutura, na tentativa de causar a ressonância, de acordo com a equação (20):

$$F(t) = P \alpha_i \cos(2\pi i f_p t) \quad (20)$$

Onde:

F(t): força representativa da atividade humana ao longo do tempo (N);

P: peso do indivíduo;

i: múltiplo harmônico da frequência do passo;

$\alpha_i$ : coeficiente de Fourier associado ao i-ésimo harmônico da atividade;

$f_p$ : frequência do passo da atividade (Hz);

t: tempo (s).

Na Tabela 12 são apresentados valores da frequência do passo da atividade ( $f_p$ ) e coeficientes dinâmicos ( $\alpha_i$ ) associados aos diversos tipos de atividades humanas.

Tabela 12 - Faixas de frequências de atividades humanas (AISC, 2016, p. 12)

Frequência de excitação do passo ( $f_p$ ) e coeficientes dinâmicos* ( $\alpha_i$ )						
Harmônico	Caminhada		Atividade aeróbica		Dança	
l	$f_p$ (Hz)	$\alpha_i$	$f_p$ (Hz)	$\alpha_i$	$f_p$ (Hz)	$\alpha_i$
1	1,6 a 2,2	0,5	2,0 a 2,75	1,5	1,5 a 3,0	0,5
2	3,2 a 4,4	0,2	4,0 a 5,5	0,6	-	-
3	4,8 a 6,6	0,1	6,0 a 8,25	0,1	-	-
4	6,4 a 8,8	0,05	-	-	-	-

\* Coeficiente dinâmico significa o pico da força senoidal dividido pelo peso da pessoa.

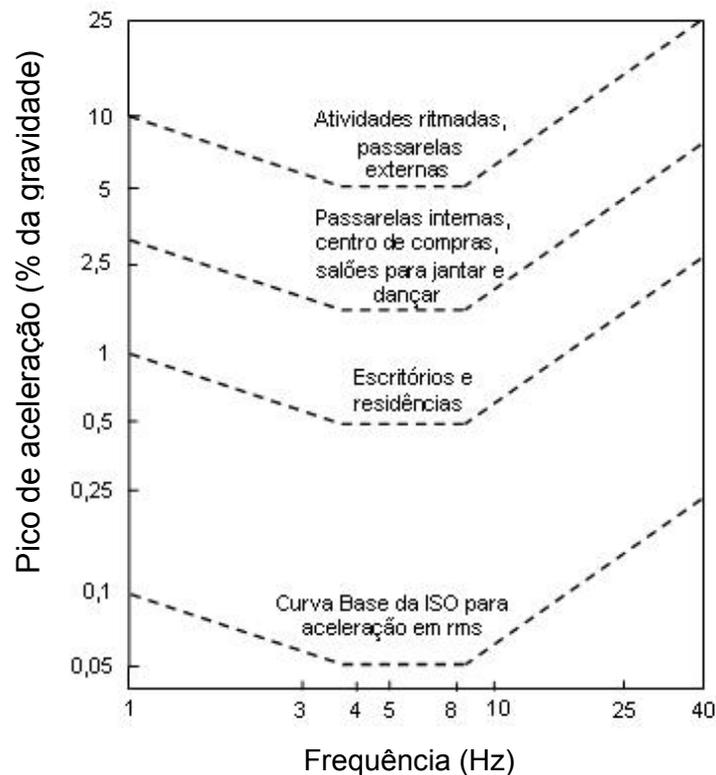


Figura 38 - Valores de aceleração de pico recomendados para o conforto humano devido a atividades humanas (AISC, 2016, p. 7)

A aceleração de pico das atividades rítmicas é determinada sob dois tipos de cálculos, sendo o primeiro referente à estrutura em ressonância ( $f=f_n$ ), onde a frequência natural do piso é igual ou próxima a frequência de excitação da atividade rítmica exercida, e o outro quando a estrutura encontra-se afastada da frequência de excitação das atividades rítmicas ( $f_n > 1,2f$ ). Estes cálculos estão representados nas equações (21) e (22).

Em ressonância ( $f=f_n$ ):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1,3\alpha_i w_p}{2\xi w_i} \quad (21)$$

Acima da ressonância ( $f_n > 1,2f$ ):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1,3}{(f_n/f)^2} \cdot \frac{\alpha_i w_p}{w_i} \quad (22)$$

Onde:

$a_p/g$ : razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade;

$\alpha_i$ : coeficiente de Fourier associado ao  $i$ -ésimo harmônico da atividade;

$w_p$ : carga efetiva por unidade de área das pessoas distribuídas sobre o piso;

$w_t$ : carga total por unidade de área do piso, incluindo os ocupantes;

$\xi$ : taxa de amortecimento modal (amortecimento crítico).

Os valores de  $\alpha_i$  e  $w_p$  são apresentados na Tabela 13, em função da atividade rítmica realizada sobre a estrutura.

O guia menciona a ocorrência de muitos problemas de vibrações em estrutura pela proximidade dos harmônicos mais altos das atividades rítmicas com a frequência natural da estrutura, devido ao relatado é utilizado a equação (21) para obtenção da aceleração de pico. Entretanto é importante observar que as acelerações geradas a partir dos harmônicos mais baixos (primeiro ou segundo) da atividade podem apresentar valores consideráveis, que influenciam de certa forma na estrutura, por este fato utiliza-se a equação (22).

Tabela 13 - Carregamento estimado durante atividades rítmicas (AISC, 2016, p. 38)

Atividade	Frequência da atividade, f (Hz)	Peso dos participantes* ( $w_p$ )		Coeficiente dinâmico ( $\alpha_i$ )	carga dinâmica ( $\alpha_i \cdot w_p$ )	
		kPa	psf		kPa	psf
Dança:Primeiro harmônico	1,5 – 3	0,6	12,5	0,5	0,3	6,2
Concertos ou eventos esportivos:						
Primeiro harmônico	1,5 – 3	1,5	31,0	0,25	0,4	7,8
Segundo harmônico	3 – 5	1,5	31,0	0,05	0,075	1,6
Exercícios de saltos:						
Primeiro harmônico	2 – 2,75	0,2	4,2	1,5	0,3	6,3
Segundo harmônico	4 – 5,5	0,2	4,2	0,6	0,12	2,5
Terceiro harmônico	6 – 8,25	0,2	4,2	0,1	0,020	0,42
*Com base na maior densidade de participantes para condições comumente encontradas. A densidade dos participantes pode ser maior para eventos especiais.						

Existe outra maneira de se determinar a aceleração máxima, no qual contabiliza todos os harmônicos, que é expressa pela equação (23) (Allen, 1990) e AISC (2016):

$$a_m = \left[ \sum a_i^{1,5} \right]^{1/1,5} \quad (23)$$

Onde  $a_i$  é a aceleração de pico para o  $i$ -ésimo harmônico.

As acelerações máximas obtidas nas equações 20 a 22 são então comparados com o valor limite de aproximadamente 5% da gravidade obtida pela curva base da ISO 2631/2 (1989) na Figura 38, relacionada as atividades rítmicas. É importante comentar que as áreas adjacentes aos locais onde são praticados exercícios rítmicos, apresentam uma grande sensibilidade a estas atividades rítmicas. Portanto, o valor da aceleração máxima  $a_m$  deve ser reduzida nestas áreas com grande sensibilidade, conforme o modo de vibração da estrutura.

As forças dinâmicas geradas pelas atividades rítmicas tendem a ter grandes amplitudes e em casos de ressonância é maior ainda, de modo que a adoção de maiores valores de amortecimento e massa estrutural não são suficientes para redução do nível de vibração.

O guia recomenda que a frequência fundamental do piso deve ser maior que o maior harmônico da frequência da atividade praticada. De modo a atender este critério, inverte-se a equação (22), resultando na equação (24):

$$f_n \geq f \cdot \sqrt{1 + \frac{k}{(a_o / g)} \cdot \frac{\alpha_i w_p}{w_t}} \quad (24)$$

Onde:

$k$ : constante (1,3 para dança; 1,7 para concertos ou eventos esportivos e 2,0 para atividades aeróbicas);

$a_o/g$ : aceleração limite (0,05; ou menor, se locais próximos à atividade praticada forem afetados pela vibração).

$f$ : frequência da atividade ( $f = f_p \cdot i$ )

As respostas provenientes das equações (21), (22) ou (23) apresentam maior precisão do que a equação (24). Isto porque, por exemplo, em caso de ressonância com o último harmônico da frequência de excitação, o limite de aceleração pode ser atendido devido ao piso possuir massa e amortecimento suficientes ou o piso ser parcialmente carregado. A Tabela 14 fornece os valores recomendados a serem utilizados na equação (24).

Tabela 14 - Aplicação do critério de projeto de acordo com a equação (23) para atividades rítmicas (AISC, 2016, p. 39)

Atividade	Frequência da atividade <sup>(1)</sup> , f (Hz)	Peso dos participantes* (w <sub>p</sub> )		Peso total (w <sub>t</sub> )		Frequência natural mínima requerida (f <sub>n</sub> ) (Hz)
		kPa	psf	kPa	psf	
<i>Dança e jantar</i>						
a <sub>0</sub> /g = 0,02						
“pesado” 5kPa(100psf)	3	0,6	12,5	5,6	112,5	6,4
“leve” 2,5kPa (50psf)	3	0,6	12,5	3,1	62,5	8,1
<i>Concertos ou eventos esportivos</i>						
a <sub>0</sub> /g = 0,05						
“pesado” 5kPa(100psf)	5	1,5	31,0	6,5	131,0	5,9 <sup>(2)</sup>
“leve” 2,5kPa (50psf)	5	1,5	31,0	4,0	81,0	6,4 <sup>(2)</sup>
<i>Atividade aeróbica (somente)</i>						
a <sub>0</sub> /g = 0,06						
“pesado” 5kPa(100psf)	8,25	0,2	4,2	5,2	104,2	8,8 <sup>(2)</sup>
“leve” 2,5kPa (50psf)	8,25	0,2	4,2	2,7	54,2	9,2 <sup>(2)</sup>
<i>Exercícios de saltos compartilhados com levantamento de peso</i>						
a <sub>0</sub> /g = 0,02						
“pesado” 5kPa (100psf)	8,25	0,12	2,5	5,12	102,5	9,2 <sup>(2)</sup>
“leve” 2,5kPa (50psf)	5,5	0,12	2,5	2,62	52,5	10,6 <sup>(2)</sup>

## 1.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados diversos trabalhos de autores referentes a análise de vibrações de sistemas estruturais submetidos a atividades humanas rítmicas, a caracterização dinâmica de atividades humanas rítmicas, a interação dinâmica indivíduo-estrutura, e, por fim, foram apresentados critérios utilizados para a avaliação do conforto humano em estruturas submetidas a vibrações devido à ação dinâmica humana.

## 2 MODELAGEM DO CORPO HUMANO

### 2.1. Considerações iniciais

O corpo humano é uma das estruturas mais complexas pelo fato de sua massa e rigidez serem distribuídas de forma desigual ao longo da altura do corpo. Neste sentido, diversos pesquisadores desenvolveram modelos do corpo humano caracterizados por massa, rigidez e amortecimento, visto que tais modelos representam de modo mais realista o ser humano. Esses modelos biodinâmicos podem representar uma pessoa parada, em pé ou sentada (ISO 5982, 1981; MATSUMOTO; GRIFFIN, 2003; SACHSE et al., 2003) e pessoas correndo (FERRIS et al., 1998; NIGG; LIU., 1999, TOSO et al., 2016)

É importante destacar, com base na revisão bibliográfica apresentada pelo capítulo 1, pesquisas apontaram a modificação do comportamento dinâmico estrutural, no que se refere ao amortecimento e frequência natural, em virtude da consideração da presença do indivíduo sobre a estrutura (SIM et al., 1996; LITTLER, 1996; BARKER; MACKENZIE, 2008; ŽIVANOVIĆ et al., 2009; SALYARDS; FIRMAN., 2011; SALYARDS; NOSS., 2014; AN et al., 2016; HE et al., 2017; SHAHABPOOR et al., 2017). Desta maneira, as características dinâmicas do ser humano influenciam no comportamento estrutural, de tal modo que a simples consideração que o ser humano atua como uma massa acoplada a estrutura é algo bem questionável e ultrapassado. Na sequência estão presentes os modelos desenvolvidos por diversos pesquisadores através das seções 2.1 e 2.2.

### 2.2 Modelo biodinâmico

Diversos pesquisadores consideraram uma modelagem do corpo humano constituída basicamente da massa e amortecimento do indivíduo, como Ji e Ellis (1995), Ferris et al. (1998), Hothan (1999) e Willians et al. (1999). A Figura 39 ilustra um modelo genérico desta modelagem biodinâmica. Na sequência, a Tabela 15

apresenta as características dinâmicas de um pessoa parada em pé, determinadas pelos estudos desenvolvidos por Hothan (199) e Willians et al. (1999).

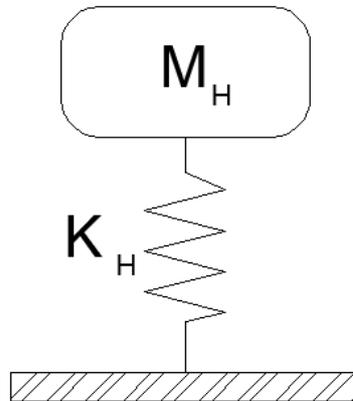
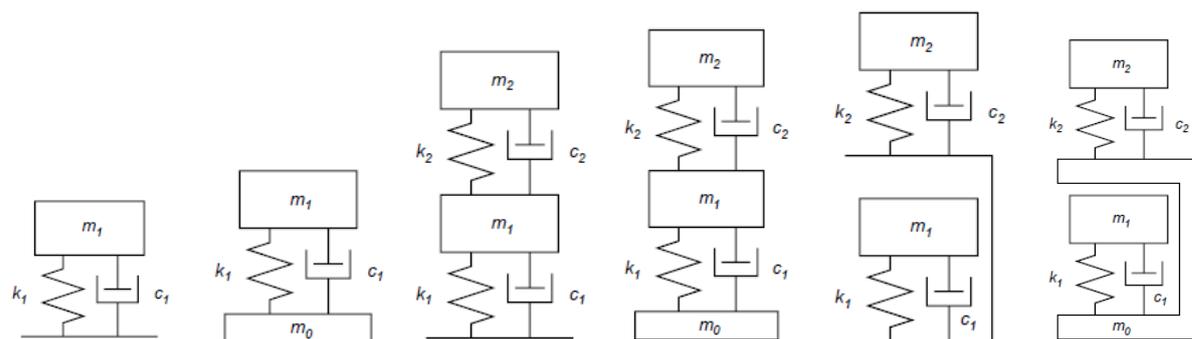


Figura 39 - Modelo biodinâmico não amortecido (JI., ELLIS, 1995; FERRIS et al.1999; HOTHAN, 1999 e WILLIANS et al.,1999)

Tabela 15 - Características dos modelos de um grau de liberdade (1GL) sem amortecimento de uma pessoa passiva parada em pé (HOTHAN, 1999; WILLIAMS et al., 1999)

Modelos sem amortecimento	Propriedades do indivíduo	Frequência do indivíduo
Hothan (1999)	$m = 80 \text{ Kg}$ $k = 113,7 \text{ KN/m}$	6,0 Hz
Willians et al. (1999)	$m = 75 \text{ Kg}$ $k = 66 \text{ KN/m}$	4,7 Hz

Posteriormente, Matsumoto e Griffin, (2003) desenvolveram seis modelos biodinâmicos, considerando um e dois graus de liberdade único de liberdade constituído de massa, rigidez e amortecimento, conforme a Figura 40, diferentemente dos modelos estudados por Ji e Ellis (1995), Hothan (1999) e Willians et al. (1999). Esses modelos foram desenvolvidos a partir do estudo da biomecânica do corpo humano sentado e em pé, usando uma mesa de agitação. Os parâmetros de cada modelo foram identificados ajustando as massas aparentes experimentais e teóricas de cada um dos seis modelos. Os autores descobriram que os dois modelos 2DOF (Modelos 2a e 2c) obtiveram o melhor ajuste entre a massa aparente medida e teórica e o ângulo de fase, de forma que tal conclusão divergiu com as pesquisas realizadas por Matsumoto e Griffin (1998) para os sujeitos sentados. Os parâmetros dos seis modelos estão apresentados na Tabela 16.



a) Modelo 1a b) Modelo 1b c) Modelo 2a d) Modelo 2b e) Modelo 2c f) Modelo 2d

Figura 40 - Modelos biodinâmicos (MATSUMOTO; GRIFFIN, 2003)

Tabela 16 - Parâmetros biodinâmicos dos seis modelos em (MATSUMOTO e GRIFFIN, 2003)

Parâmetro		Modelo 1a	Modelo 1b	Modelo 2a	Modelo 2b	Modelo 2c	Modelo 2c
Frequência natural (Hz)	$f_{H1}$	5,74	5,87	13,92	15,58	13,19	13,47
	$f_{H2}$	-	-	5,96	5,88	5,83	5,88
Taxa de amortecimento (%)	$\xi_{H1}$	69	61	37	24	43	33
	$\xi_{H2}$	-	-	40	43	36	36
Rigidez (N/m)	$K_1$	1340	1300	4390	4390	2370	1820
	$K_2$	-	-	553	596	849	893
Amortecimento (Ns/m)	$C_1$	51,6	43,1	37,1	21,6	24,8	14,2
	$C_2$	-	-	11,8	13,8	16,5	17,6
$m_0$		-	0,0955	-	0,0894	-	0,0909
Massa modal	$m_1$	1,03	0,0955	0,574	0,458	0,345	0,254
	$m_2$	-	-	0,394	0,437	0,633	0,655

### 2.3 Modelos biodinâmicos considerando a vibração estrutural

No intuito de simular a interação humano-estrutura, sugeriu-se que tanto as pessoas, quanto a estrutura fossem modeladas como um sistema SDOF. O modelo é formado colocando o corpo humano SDOF sobre a estrutura simulada por um SDOF, como mostrado na Figura 41. Diversos autores desenvolveram estudos sobre esta modelagem, tais como ISO 5982 (1981), Foschi et al. (1995), Ellis e Ji (1997), Brownjohn (1999,2001) Falati (1999), Zheng e Brownjohn (2001), Sachse et al.(2004); Alexander (2006), Sim et al. (2006), Jones et al. (2011b). Na sequência, a Tabela 17 apresenta os parâmetros dinâmicos dos modelos de corpo humano parados em pé por diferentes estudos.

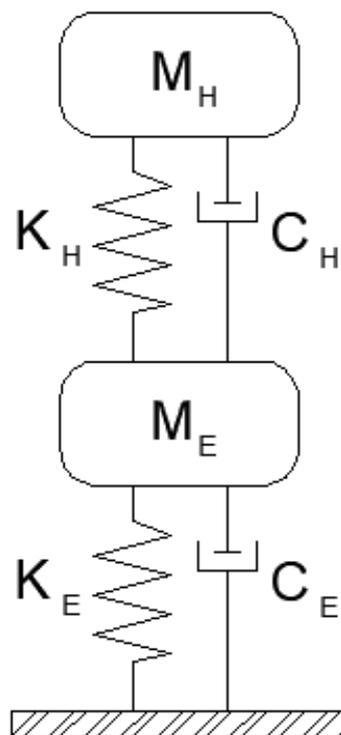


Figura 41 - Modelo de Interação ser humano - estrutura (ELLIS; JI,1997; BROWNJOHN, 1999,2001; ZHENG; BROWNJOHN, 2001;SACHSE ET AL.,2004; ALEXANDER, 2006; ZHOU; JI, 2006; SIM ET AL.,2006; JONES ET AL ,2011)

Tabela 17- Parâmetros dinâmicos dos modelos de corpo humano passivo em pé por diferentes estudos

Modelos sem amortecimento	Propriedades do indivíduo	Propriedades modais do indivíduo
ISO 5982 (1981)	$m_1 = 62 \text{ Kg}$ $k_1 = 62 \text{ KN/m}$ $c_1 = 1,46 \text{ Ns/m}$ $m_2 = 13 \text{ Kg}$ $k_2 = 80 \text{ KN/m}$ $c_2 = 0,93 \text{ KNs/m}$	$f_1 = 5 \text{ Hz}$ $\xi_1 = 37\%$ $f_2 = 12,5 \text{ Hz}$ $\xi_2 = 46\%$
Foschi et al. (1995)	$m = 91 \text{ Kg}$ $k = 40 \text{ KN/m}$ $c = 1,25 \text{ KNs/m}$	$f = 3,3 \text{ Hz}$ $\xi = 33\%$
Brownjohn (1999)	$m = 80 \text{ Kg}$ $k = 82 \text{ KN/m}$ $c = 1,946 \text{ KNs/m}$	$f = 4,9 \text{ Hz}$ $\xi = 37\%$
Falati (1999)	$m = m_t/3 = 25 \text{ Kg}$ $k = 107 \text{ KN/m}$ $c = 1,636 \text{ KNs/m}$	$f = 10,43 \text{ Hz}$ $\xi = 50\%$
Brownjohn (2001)	$m = 1,28 M_h (47 \text{ Kg})$ $k = 80 \text{ KN/m}$ $c = 1,662 \text{ KNs/m}$	$f = 5,8 \text{ Hz}$ $\xi = 38\%$
Zheng e Brownjohn (2001)	$m = 63 \text{ Kg}$ $k = 68 \text{ KN/m}$ $c = 1,618 \text{ KNs/m}$	$f = 5,24 \text{ Hz}$ $\xi = 39\%$

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 com sistemas com um grau de liberdade com valores de frequências naturais na faixa de 5 Hz 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%.

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 apresenta um par interno de forças biodinâmicas ( $F_{bio}$ ), que é inserido no equilíbrio dinâmico do sistema da pessoa, conforme ilustrado na Figura 42. 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 (25).

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 (26). A equação (27) é obtida ao se reordenar a equação (26)

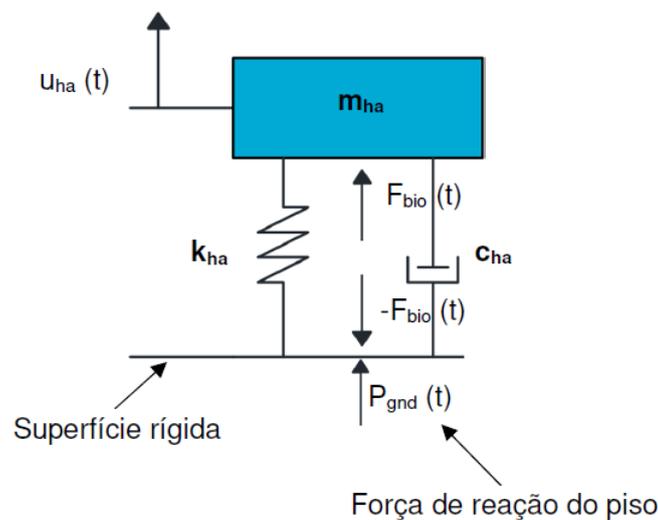


Figura 42 - Modelo de interação ativa de 1 grau de liberdade (ZHANG; GEORGAKIS; CHEN, 2016)

$$m_{ha} \ddot{u}_{ha}(t) + c_{ha} \dot{u}_{ha}(t) + k_{ha} u_{ha}(t) = F_{bio}(t) \quad (25)$$

$$-F_{bio}(t) + c_{ha} \dot{u}_{ha}(t) + k_{ha} u_{ha}(t) = -P_{gnd}(t) \quad (26)$$

$$F_{bio}(t) = P_{gnd}(t) + c_{ha} \dot{u}_{ha}(t) + k_{ha} u_{ha}(t) \quad (27)$$

Ao substituir a equação (26) na equação (24), se obtém a equação (28), 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).

$$m_{ha} \ddot{u}_{ha} = P_{gnd}(t) \quad (28)$$

## 2.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou trabalhos desenvolvidos por diversos autores sobre modelos biodinâmicos, representando o ser humano em diferentes posturas, tais como sentados, em pé, correndo, caminhando e pulando.

### 3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1. Considerações iniciais

Este capítulo descreve os testes experimentais desenvolvidos em laboratório, com base na apresentação dos equipamentos utilizados para a investigação e a estratégia desenvolvida para a determinação das características relativas ao comportamento dinâmico do ser humano, tais como: força dinâmica, aceleração, velocidade e deslocamento. Os ensaios experimentais realizados neste estudo simularam saltos sincronizados por 100 (Cem) diferentes indivíduos, visando reproduzir os movimentos executados em uma aula de ginástica aeróbica (jumping).

#### 3.2. Descrição dos testes experimentais

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ (PGECIV/FEN/UERJ). A Figura 43 apresenta o fluxograma contendo cada etapa dos ensaios experimentais. As seguintes considerações foram definidas nos ensaios experimentais:

- Tipo de excitação do ser humano: saltos individuais
- Frequência de excitação: 2,20 Hz
- Estímulo sonoro: Metrônomo
- Direção do movimento: vertical
- Pontos medidos: pessoa e plataforma
- Duração do ensaio: 20 segundos
- Tipo de estrutura utilizada: Plataforma rígida de MDF

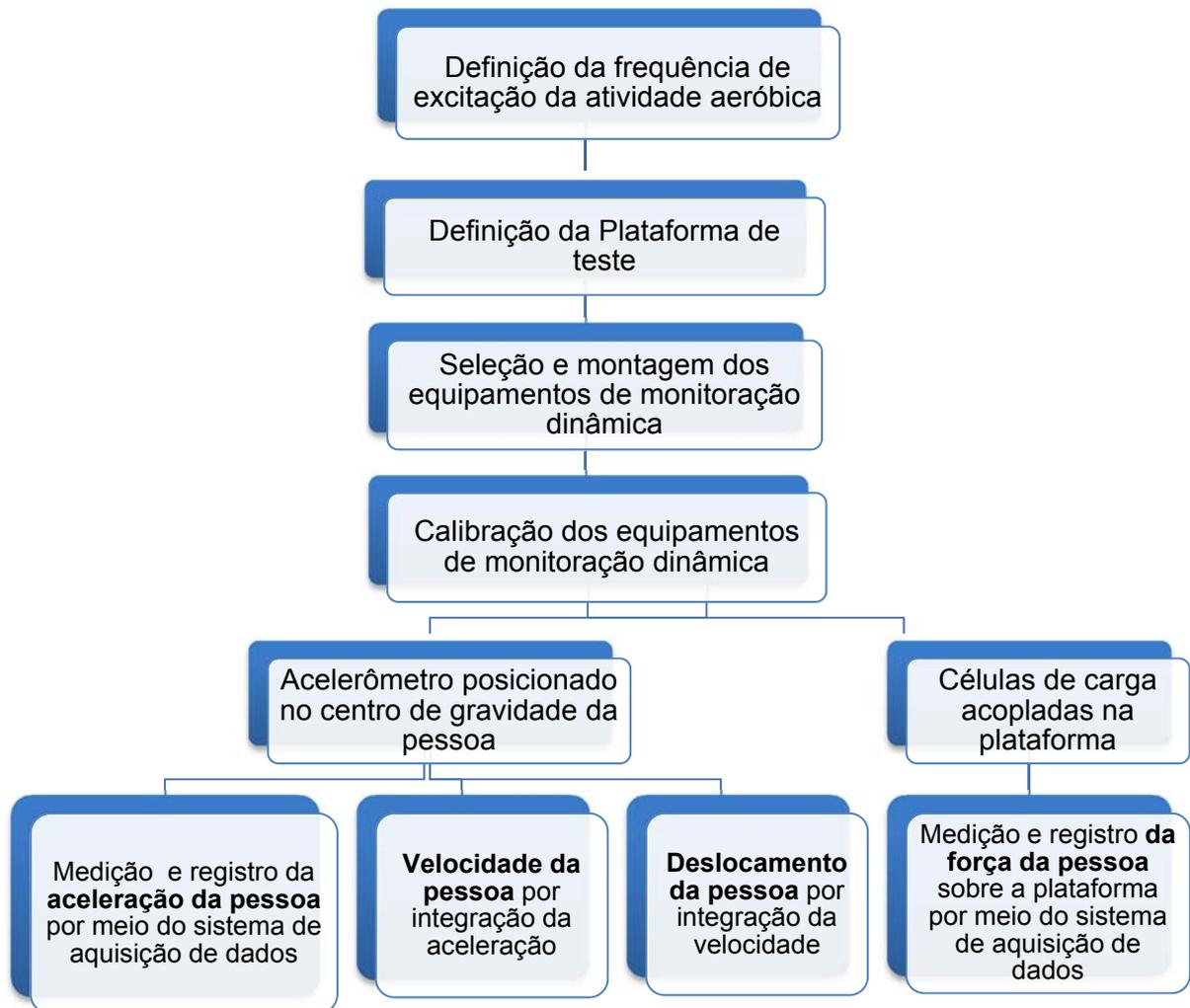


Figura 43 - Metodologia de análise utilizada para os testes experimentais

Inicialmente, a frequência de excitação da atividade aeróbica é definida como 2,20 Hz, de modo a forçar um movimento ressonante do piso com o quarto modo de vibração vertical ( $f_{04}=6,65\text{Hz}$ , ver Tabela 28). 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.

Na sequência, ao longo do desenvolvimento do projeto da plataforma, definiu-se utilizar uma estrutura de MDF, com dimensões de 600mm x 600mm x 25mm. A plataforma de MDF é constituída por chapas de madeiras aglutinadas, sendo definida como uma estrutura rígida e leve. Portanto, as frequências naturais da plataforma rígida de MDF não interagem com a frequência da força externa – neste caso, a atividade rítmica humana – quanto à frequência natural do corpo humano.

A próxima etapa é a definição dos equipamentos escolhidos para a realização dos ensaios experimentais. Desta forma, foram escolhidas três células de carga acopladas em uma plataforma de MDF, um acelerômetro localizado no centro de gravidade das pessoas, uma plataforma de MDF, um metrônomo, um sistema de aquisição de dados ADS 2002 e um computador. Estes equipamentos estão representados na Figura 44.

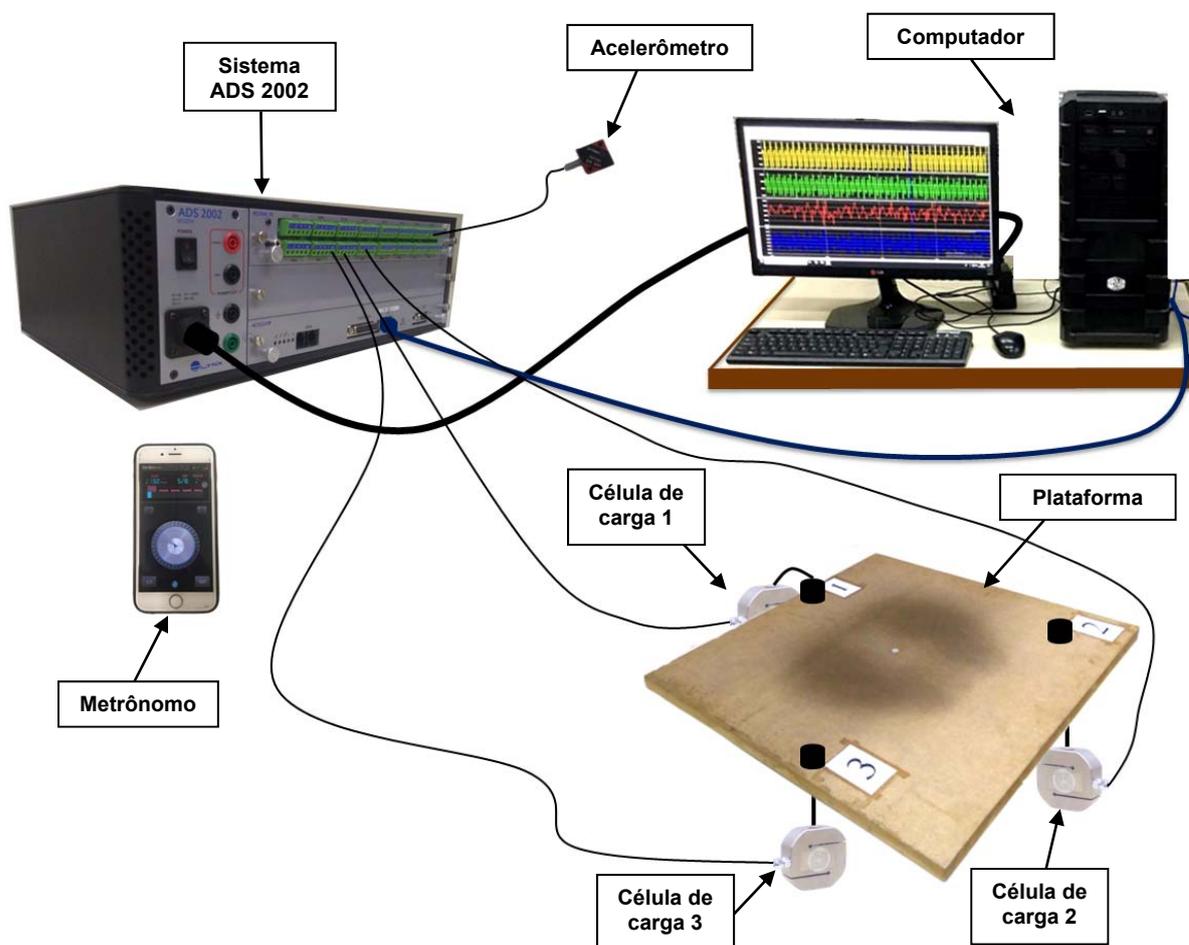


Figura 44 - Conjunto de equipamentos utilizados para a realização dos ensaios

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. É importante destacar que as células de carga foram conectadas à plataforma de MDF através de parafusos do tipo M16x2. O esquema referente ao posicionamento das células de carga é apresentado na Figura 45. Cabe

ressaltar que os saltos foram realizados no centro de gravidade do sistema (plataforma + três células de carga).

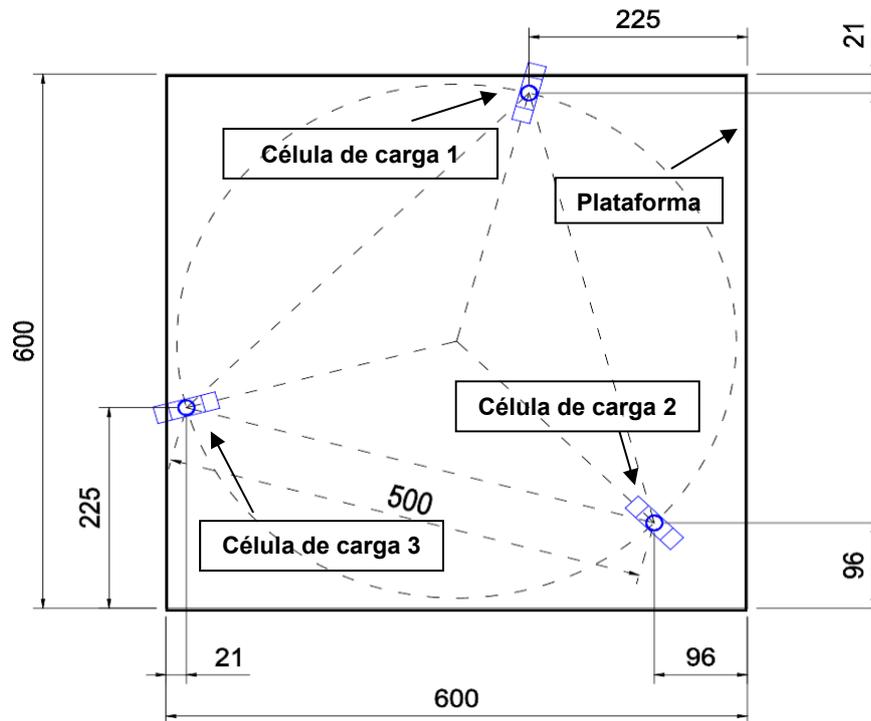


Figura 45 - Croqui de posicionamento das células de carga

O acelerômetro foi acoplado em uma placa de alumínio de 150 mm x 100 mm, com espessura de 5 mm e blocos cúbicos em alumínio com aresta de 20 mm com furos M2. Os blocos foram colados nas placas de alumínio e os acelerômetros aparafusados na base cúbica. Utilizou-se “velcros” dos tipos “loop” e “hook”, com 25 mm de largura para fixar o conjunto (placa, base e acelerômetro) nas pessoas. As Figuras 46 e 47 mostram o esquema do posicionamento do acelerômetro acoplado na pessoa.

Nesta próxima etapa, os dispositivos de monitoração dinâmica [células de carga e acelerômetro] foram conectados ao sistema de aquisição de dados ADS-2002, através dos cabos de cada equipamento. Nesse sentido, foram utilizados os canais 1 ao 3 para conectar os fios referentes as células de carga, enquanto o canal 15 se refere ao acelerômetro [ver Figura 48].



Figura 46 - Posicionamento do acelerômetro no centro de gravidade do indivíduo

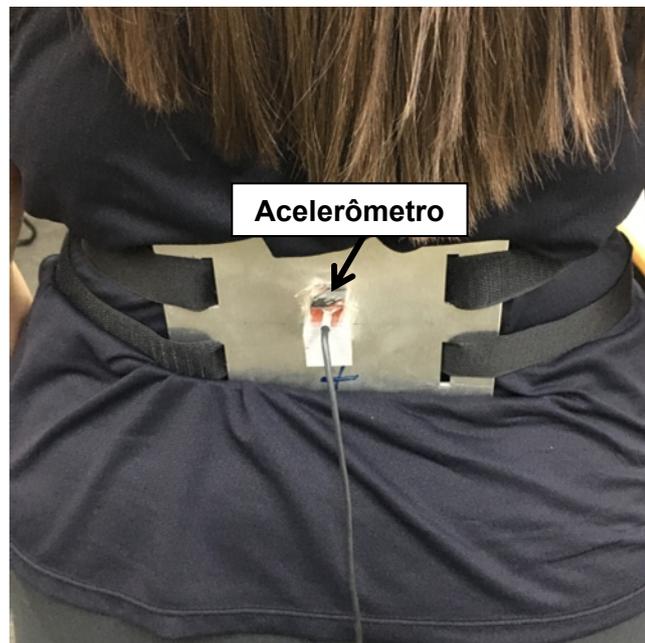


Figura 47 - Detalhe do acoplamento do acelerômetro ao indivíduo

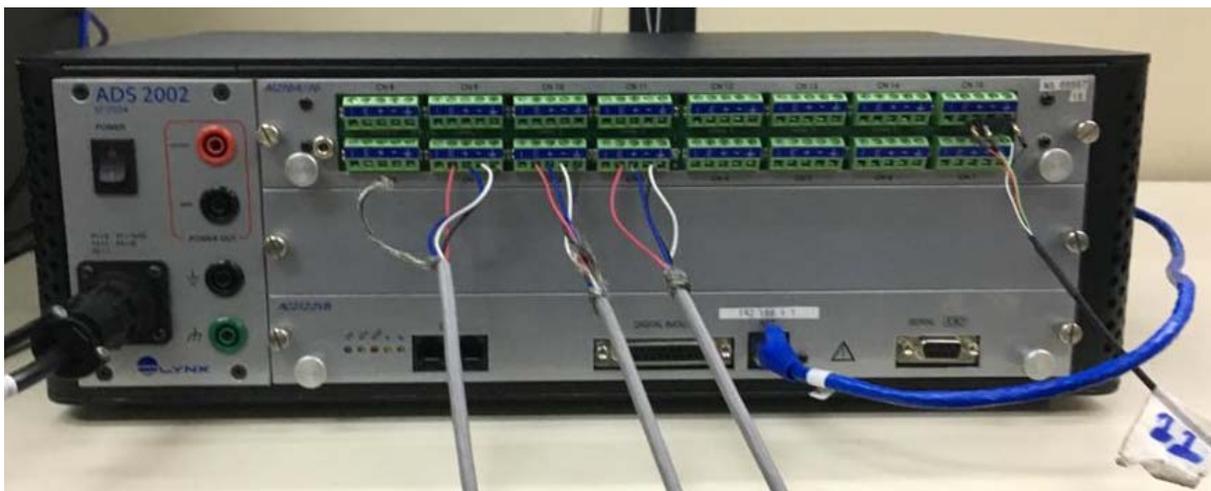


Figura 48 - Sistema de aquisição de dados ADS-2002 conectado ao acelerômetro e células de carga

Nesta etapa, as três células de carga e do acelerômetro foram calibradas 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.

Finalmente, iniciaram-se os testes experimentais, de tal modo que foram selecionadas 100 (Cem) pessoas para participar dos ensaios experimentais. Todas 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 49).



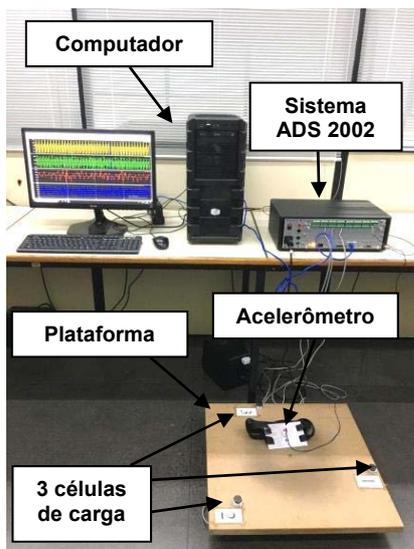
Figura 49 - Balança digital

O metrônomo é um dispositivo que produz pulsos sonoros de duração regular, sendo utilizado para garantir a sincronização da pessoa ao movimento executado. A unidade representativa do metrônomo é o “bpm” (batidas por minuto). Portanto, cada “batida” sonora corresponde ao contato de cada passo da pessoa sobre a estrutura. Tendo em vista que a frequência selecionada para a realização dos saltos dos indivíduos é 2,20 Hz, deste modo o valor ajustado no metrônomo foi fixado em 132 bpm ( $f = 2,20 \text{ Hz}$ ). A Figura 50 apresenta o metrônomo utilizado nos ensaios.



Figura 50 - Aplicativo metrônomo instalado no celular

Durante os ensaios experimentais, com base no emprego de transdutores de força (células de carga) e de acelerômetros foram medidos e registrados, por meio de um sistema de aquisição de dados ADS-2000, informações relativas à força aplicada sobre a plataforma de MDF e aceleração no centro de gravidade das pessoas, com o objetivo de utilizar estas informações para a determinação das características dinâmicas do modelo biodinâmico desenvolvido neste trabalho de pesquisa. Deste modo, os dados experimentais foram registrados permitindo a análise da atividade rítmica no que diz respeito à ação humana, bem como em relação à obtenção das propriedades dinâmicas do corpo [capítulo 4]. As Figuras 51 a 53 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

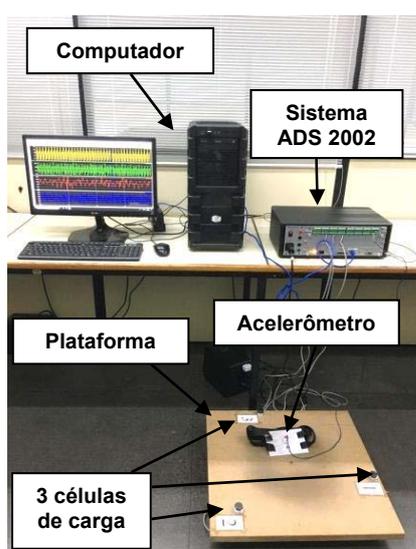


e) 5º etapa: Pessoa flexionando os joelhos na aterrissagem sobre a plataforma e seguidamente se preparando para o próximo salto (4º etapa)

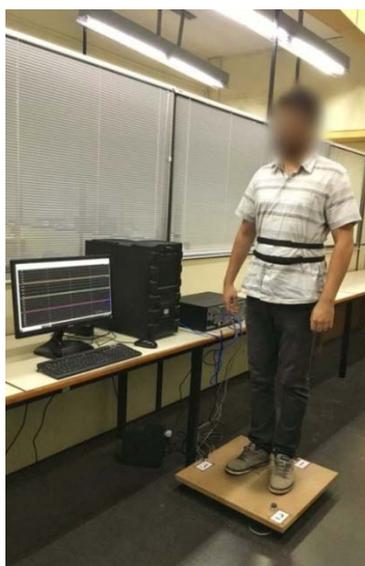


f) 6º etapa: Término do ensaio

Figura 51 - 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

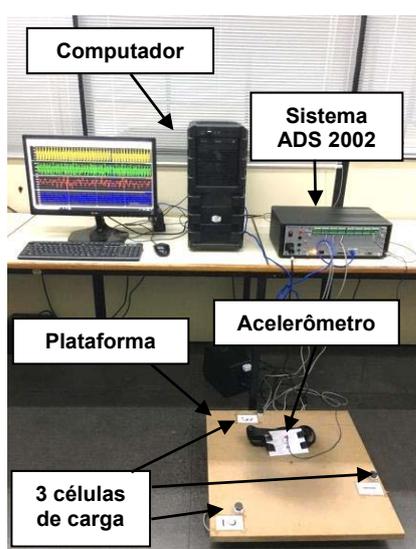


e) 5º etapa: Pessoa flexionando os joelhos na aterrissagem sobre a plataforma e seguidamente se preparando para o próximo salto (4º etapa)



f) 6º etapa: Término do ensaio

Figura 52 - Etapas do ensaio experimental: Pessoa 61 (m=88,65kg)



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

### 3.3. Equipamentos empregados nos testes experimentais

Quando almejamos realizar testes no âmbito experimental, com o intuito de determinar informações importantes nas pesquisas desenvolvidas, é essencial definir os equipamentos apropriados a serem utilizados durante os ensaios. Neste sentido, foram escolhidos equipamentos relacionados à monitoração dinâmica, disponíveis no mercado nacional e internacional. Durante os ensaios, os equipamentos empregados foram células de carga acoplada na plataforma de MDF, acelerômetro e um sistema de aquisição de dados.

#### 3.3.1 Acelerômetro Capacitivo Dytran

O acelerômetro é responsável pela medição da aceleração. O princípio básico de seu funcionamento é baseado na variação da capacitância do circuito, quando submetidos às oscilações provenientes das ações atuantes sobre o dispositivo. Conseqüentemente, pode-se medir a variação do sinal elétrico [voltagem] emitido pelo acelerômetro. É importante identificar a sensibilidade do acelerômetro (geralmente em mV/g) para utilizá-la no sistema de aquisição de dados. Esta informação pode ser encontrada no relatório de calibração ou etiqueta de identificação. O acelerômetro utilizado nos ensaios experimentais é um modelo capacitivo uniaxial, sendo apropriado para a realização de medições com alta precisão e faixa de frequência abrangente [0-1500 Hz]. O modelo do acelerômetro e seus conectores estão ilustrados nas Figuras 54 a 56, respectivamente, enquanto os dados referentes ao acelerômetro estão descritos na Tabela 18.



Figura 54 - Caixa do Acelerômetro Dytran



Figura 55 - Acelerômetro Dytran (transdutor de aceleração capacitivo)



Figura 56 - Acelerômetro Dytran. Conector fêmea (esq.) / Conector macho do cabo (dir.).

Tabela 18 - Características do acelerômetro Dytran

Modelo	Número de serial	Eixo de medição	Faixa de entrada (g)	Faixa de frequência (Hz)	Sensibilidade (mV/g)
7521A1	3051	uniaxial	1	0-1500	549,27

### 3.3.2 Célula de carga

O dispositivo é responsável por medir a deformação de um determinado corpo, convertendo uma grandeza física (deformação) em sinal elétrico (tensão). Neste sentido, a deformação do corpo é proporcional à intensidade do peso atuante sobre o dispositivo. Quando a célula de carga é submetida a deformações, conseqüentemente ocorre a variação da resistência elétrica nos quatro sensores extensores [strain gage], acoplados no interior do dispositivo.

Nos ensaios experimentais foram utilizadas três células de carga do modelo CSR-1000 com formato S, submetidas a esforços axiais [tração e compressão], conforme a Figura 57. Esses modelos de células de carga possuem capacidade nominal de 1000 Kg e sensibilidade de 2 mV/V, conforme as especificações apresentadas na Tabela 19. As células de cargas são conectadas a um sistema de

aquisição de dados, por meio de um cabo. É importante destacar que nas células de carga sob o formato S, os sensores strain gauges estão acoplados no interior do círculo central, sofrendo deformações à medida que a célula é comprimida ou tracionada. (RODOWANSKI, 2011).



a) Vista frontal de uma célula de carga



b) Vista superior de uma célula de carga



c) Vista Superior



d) Vista em perspectiva

Figura 57 - Célula de carga do modelo CSR-1000

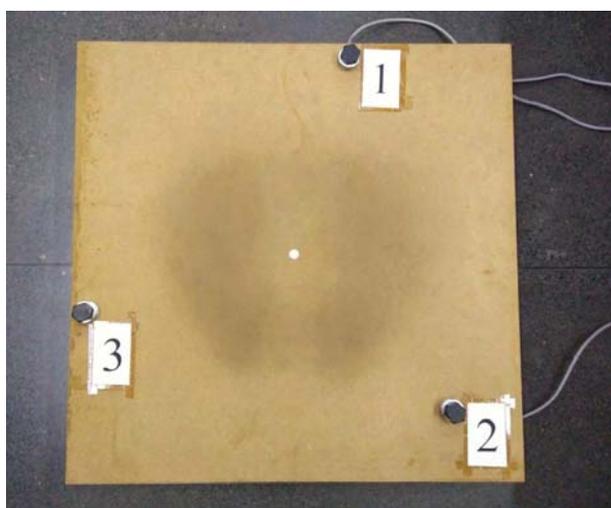
Tabela 19 - Características da célula de carga

Modelo	Material	Capacidade (Kgf)	Sensibilidade (mV/g)	Tensão de excitação (Vdc)	Fluência
CSR-1000	Aço liga	1000	2	10	0,003%

### 3.3.3 Plataforma de MDF

A plataforma de MDF possui formato quadrado, com dimensões de 600 mm x 600 mm x 25 mm e massa igual a 6,4 kg. Esta estrutura apresenta três furos destinados para o acoplamento com as células de carga [seção 3.1.2], através de parafusos do tipo M16x2. A Figura 58 apresenta a plataforma de MDF.

Realizou-se uma análise modal experimental mediante um aplicativo denominado “Sound Analyser Free”, com o intuito de obter uma indicação de como será o comportamento da mesma frente à atuação de um carregamento. Deste modo, a frequência natural da plataforma de MDF foi 62,2 Hz, de tal modo que se aproximou da frequência natural determinada numericamente pelo programa ANSYS (2009) ( $f=62,3$  Hz). As Figuras 59 e 60 ilustram as vistas do 1º modo de vibração do piso e respectiva frequência fundamental via programa ANSYS (2009), enquanto a Figura 61 apresenta as frequências naturais experimentais. Deste modo, é possível concluir que a plataforma de MDF apresenta uma elevada frequência fundamental.



a) Vista superior da plataforma



b) Vista em perspectiva da plataforma

Figura 58 - Placa de MDF utilizada nos ensaios

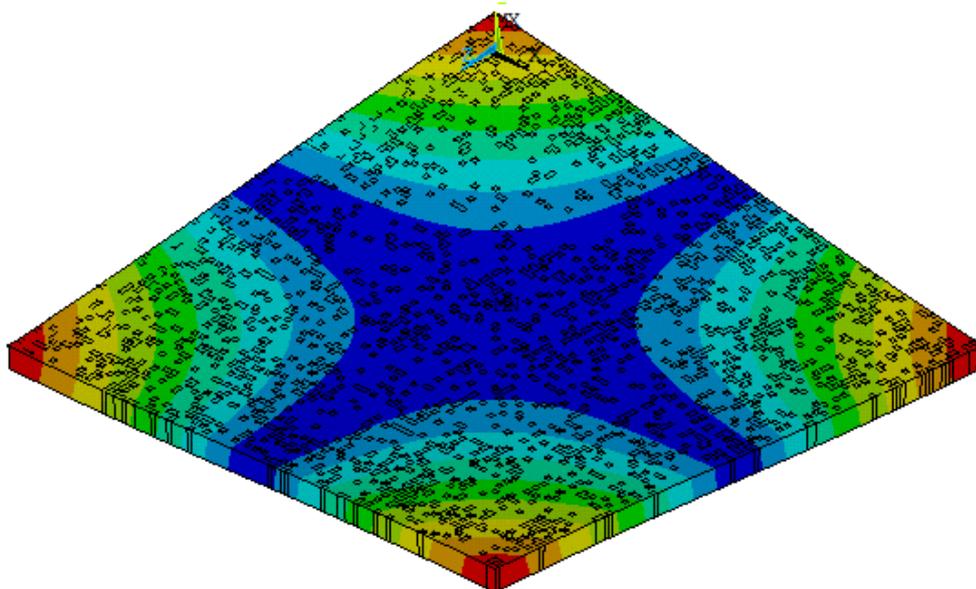


Figura 59 - Vista isométrica do 1º Modo de vibração via programa numérico computacional ANSYS (f=62,3 Hz)

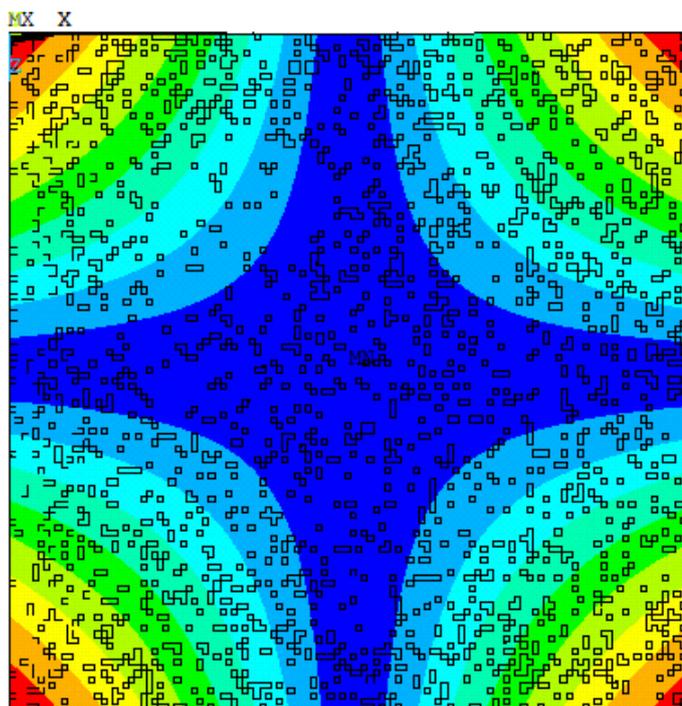


Figura 60 - Vista superior do 1º Modo de vibração via programa numérico computacional ANSYS (f=62,3 Hz)



Figura 61 - Frequência fundamental da plataforma via análise experimental ( $f=62,2\text{Hz}$ )

#### 3.3.4 ADS 2002 (sistema de aquisição de dados)

O sistema de aquisição de dados ADS 2002, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA, é utilizado para obter informações a respeito de um processo. A aquisição dessas informações é obtida pelo software AqDados, enquanto o software AqAnalysis é responsável pelo processamento dos sinais e elaboração dos relatórios [gráficos e tabela].

Inicialmente, a comunicação entre o equipamento ADS 2002 e computador é realizada via conexão Ethernet, em seguida os sensores ou transdutores [acelerômetro e células de carga] são conectados as placas condicionadoras de sinais integradas no equipamento ADS 2002 por meio de cabos. O equipamento é constituído por uma placa controladora (driver) AC2122 VB que suporta o barramento ADS200. Nesse barramento está conectada a placa condicionadora de sinais AI2164, sendo que esta placa possui 16 (dezesesseis) canais.

Posteriormente, utilizando o software AqDados, o sinal de entrada [força ou aceleração no domínio do tempo] é modificado por meio da placa condicionadora,

através de processos como amplificação ou atenuação, conversão de corrente para tensão e filtragem. Na sequência, o conversor A/D é aplicado para converter o sinal analógico de entrada [tensão] em uma informação digital [tensão], havendo uma relação entre a grandeza física (deformação específica, aceleração, força, etc.) e sinal da tensão elétrica digital. Por fim, iniciam-se os ensaios visando medir e gravar os sinais no domínio do tempo. As Figuras 62 e 63 apresentam o equipamento ADS 2002 e os sinais no domínio do tempo usando o programa AqDados, respectivamente.



Figura 62 - Sistema ADS 2002: vista frontal

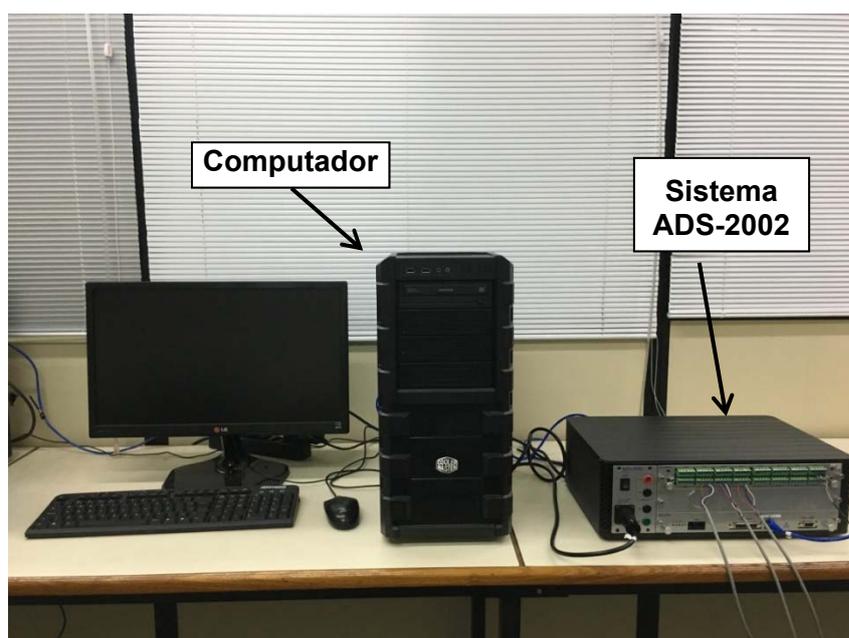


Figura 63 - Sistema de aquisição de dados ADS 2002 acoplado ao computador

Posteriormente após a aquisição dos dados, realiza-se o processamento de sinais obtidos pelo programa AqDados. O Software AqAnalysis é utilizado para realizar o pós-processamento dos sinais armazenados em séries temporais, bem como a sua visualização em forma gráfica ou em forma de tabela de dados dos arquivos, proveniente do software AqDados. A Figura 64 demonstra a tela do software AqAnalysis.

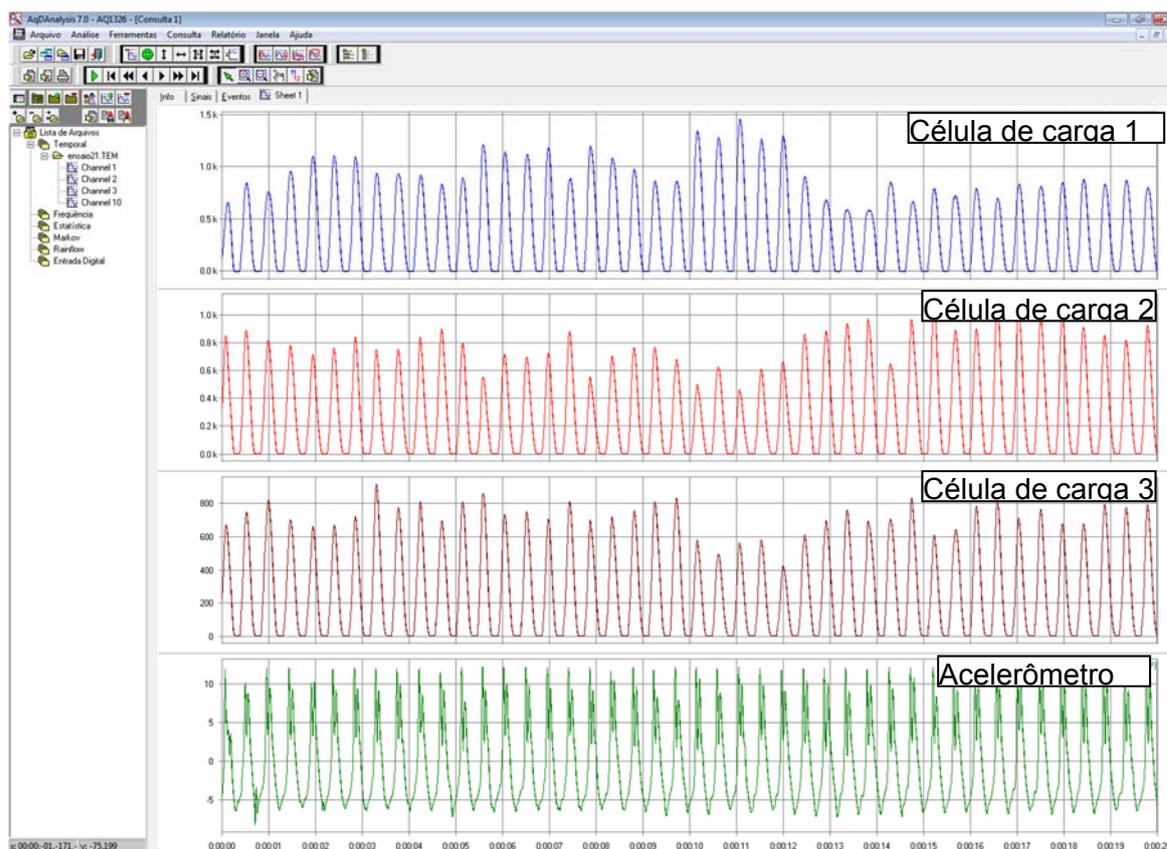


Figura 64 - Processamento dos sinais no software AQDanalysis

### 3.4. Respostas dos testes experimentais

As respostas obtidas por meio do acelerômetro acoplado ao corpo, bem como as células de cargas conectadas a plataforma de MDF, via monitoração experimental, são apresentadas graficamente nesta seção. A análise dos sinais no domínio do tempo, evidenciando seus aspectos qualitativos e quantitativos,

encontram-se na seção 3.4.1, enquanto os sinais no domínio da frequência estão na seção 3.4.2.

### 3.4.1. Domínio do tempo

As Figuras 65 a 80 apresentam alguns dos sinais experimentais do acelerômetro acoplado ao corpo, e a força exercida pelas pessoas através das células de carga, durante a execução dos saltos nas frequências de 2,20 Hz sobre a plataforma de MDF rígida. Vale a pena ressaltar que o peso contido nos títulos das Figuras 65 a 80 corresponde ao peso medido durante os testes experimentais, através da balança digital utilizada.

É importante destacar que as acelerações foram coletadas experimentalmente e integradas uma e duas vezes, via Matlab (2017) através da função “cumtrapz”, a fim de se obter a velocidade e o deslocamento, respectivamente. Posteriormente, estes sinais originalmente obtidos através dos equipamentos de monitoração dinâmica (acelerômetros (item 3.1.1) e células de carga (item 3.1.2)) foram submetidos a filtros do tipo “passa-alta” e “passa-baixa” para a realização da filtragem (limpeza) dos sinais [força, aceleração, velocidade e deslocamento], a fim de remover componentes de baixa frequência. Os valores dos “passa-alta” e “passa-baixa” foram 1 Hz e 8Hz, respectivamente. Este procedimento evita as distorções na integração numérica dos sinais (BRANDT, 2011).

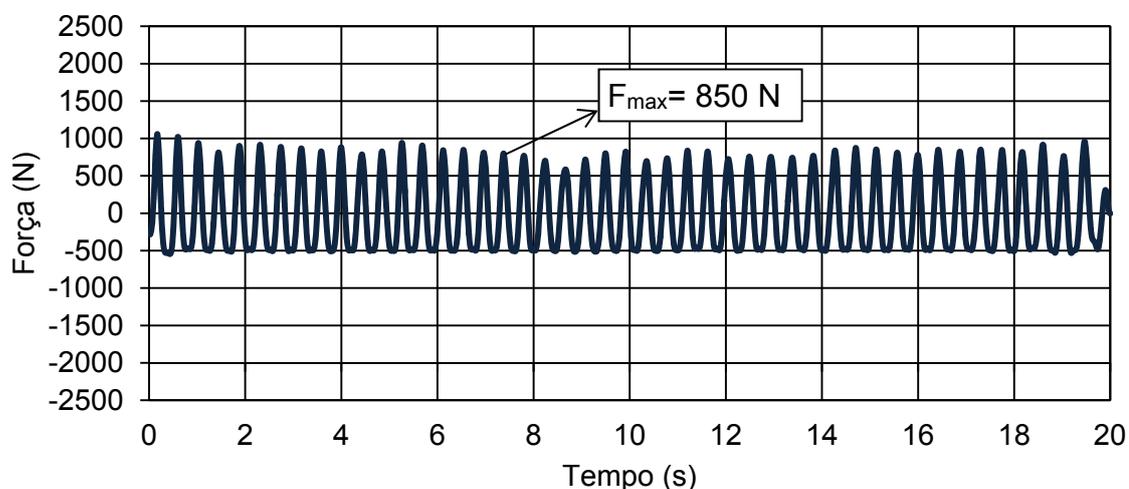


Figura 65 - Força no domínio do Tempo. Pessoa com 50,2 kg

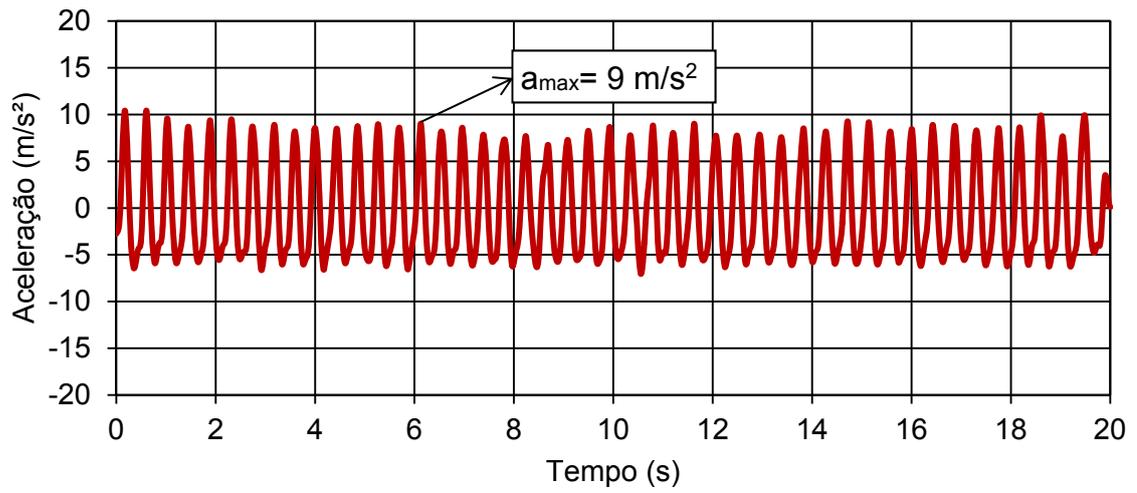


Figura 66 - Aceleração no domínio do Tempo. Pessoa com 50,2 kg

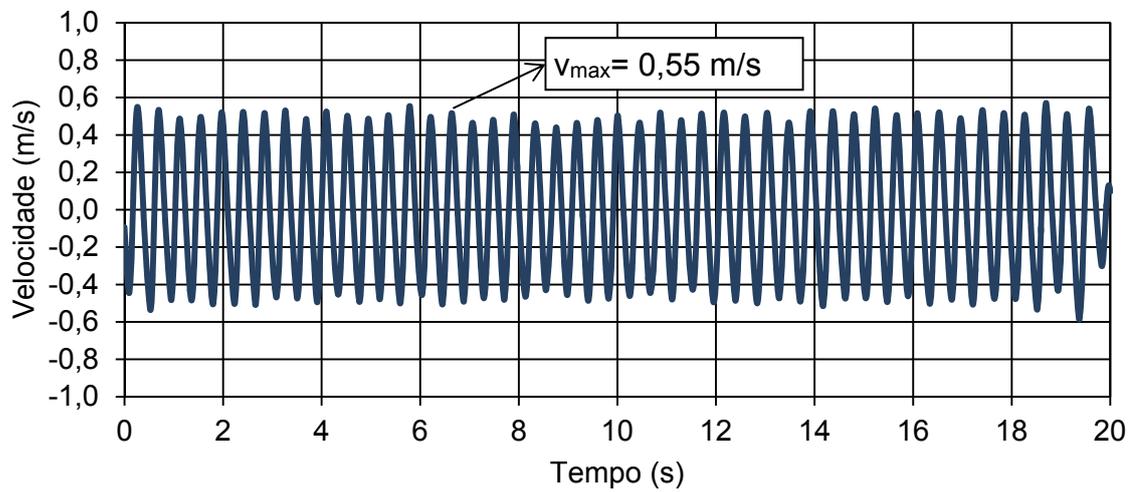


Figura 67 - Velocidade no domínio do Tempo. Pessoa com 50,2 kg

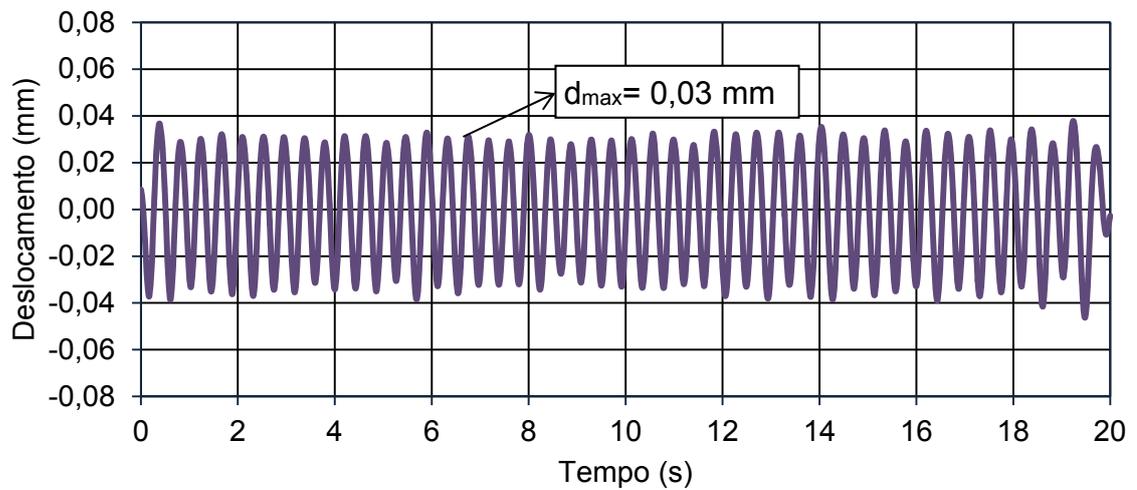


Figura 68 - Deslocamento no domínio do Tempo. Pessoa com 50,2 kg

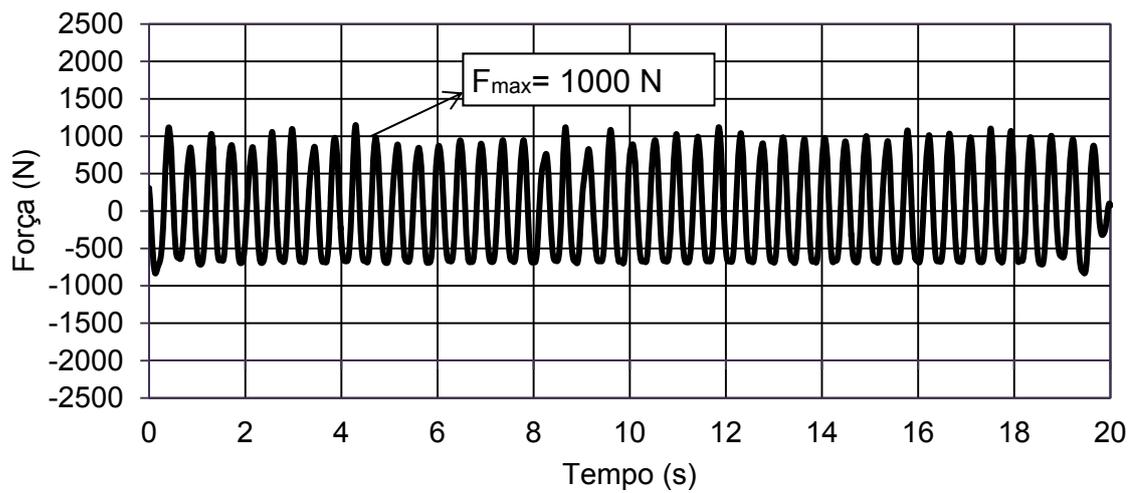


Figura 69 - Força no domínio do Tempo. Pessoa com 67,8 kg

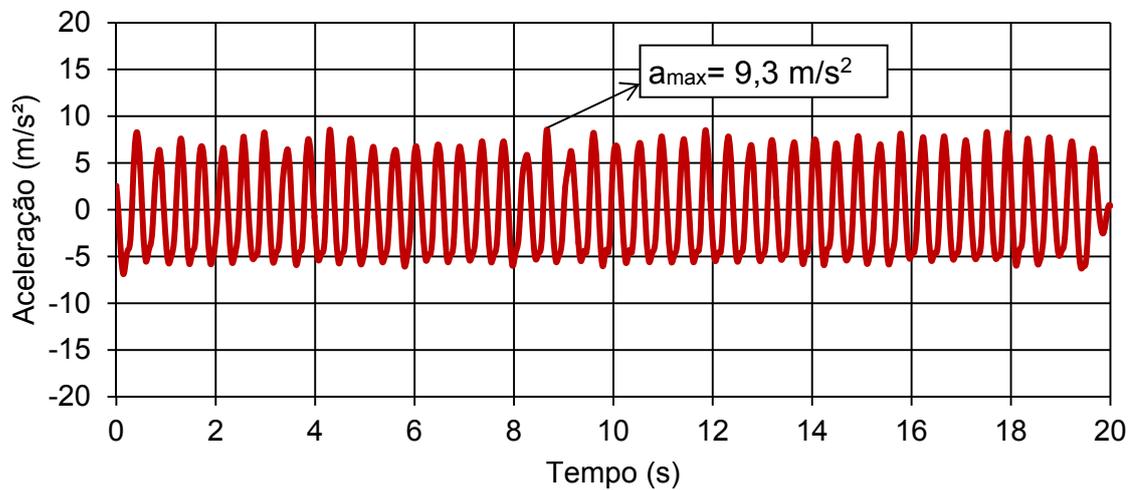


Figura 70 - Aceleração no domínio do Tempo. Pessoa com 67,8 kg

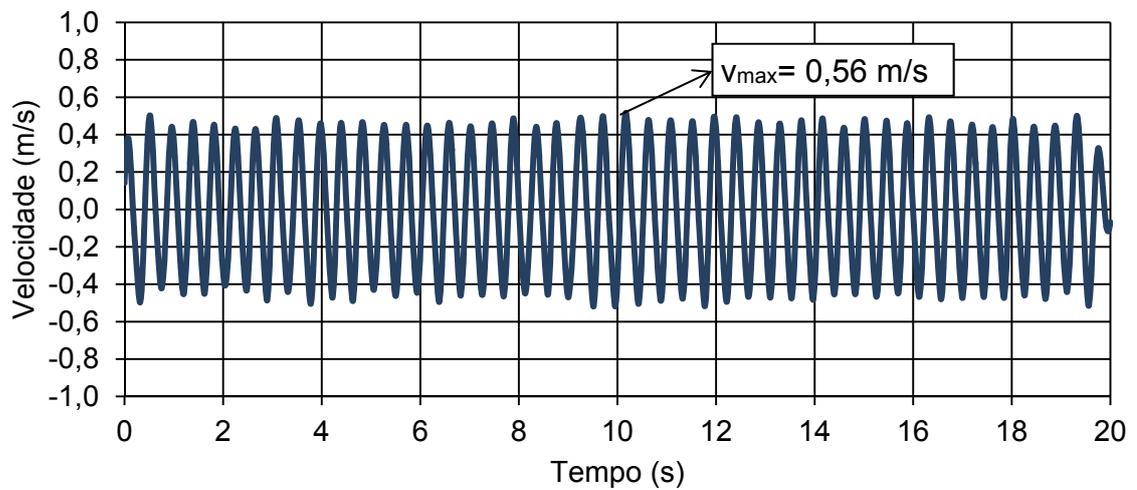


Figura 71 - Velocidade no domínio do Tempo. Pessoa com 67,8 kg

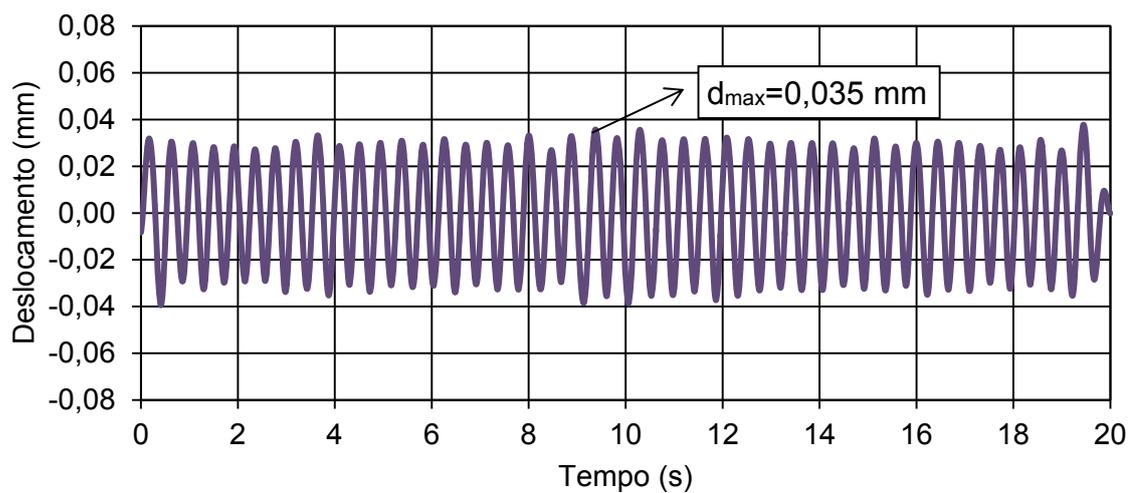


Figura 72 - Deslocamento no domínio do Tempo. Pessoa com 67,8 kg

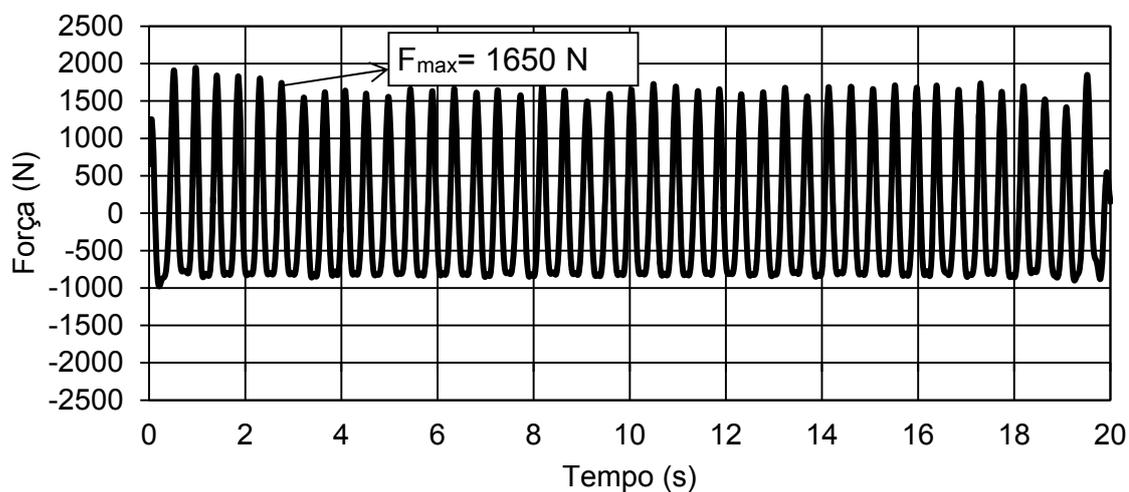


Figura 73 - Força no domínio do Tempo. Pessoa com 82,65 kg

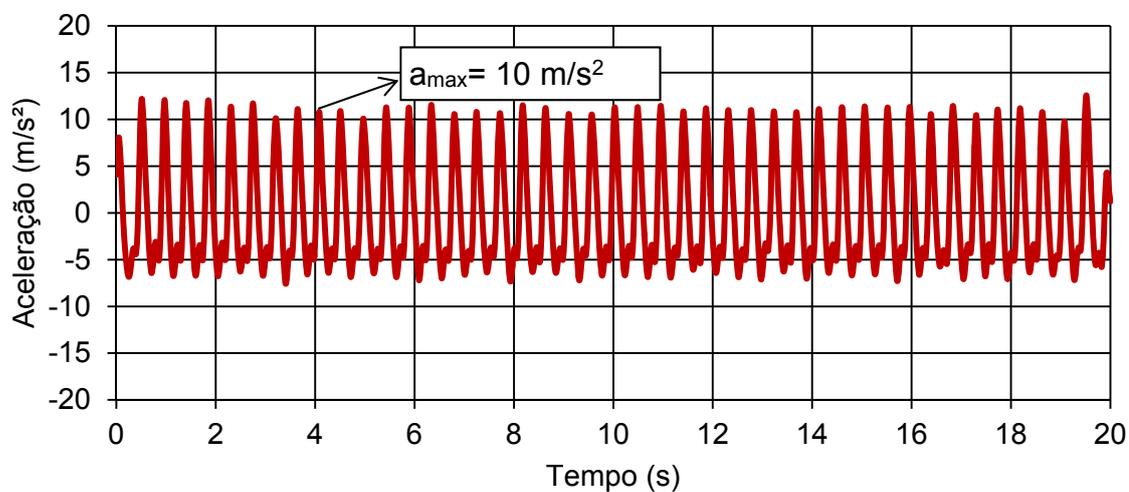


Figura 74 - Aceleração no domínio do Tempo. Pessoa com 82,65 kg

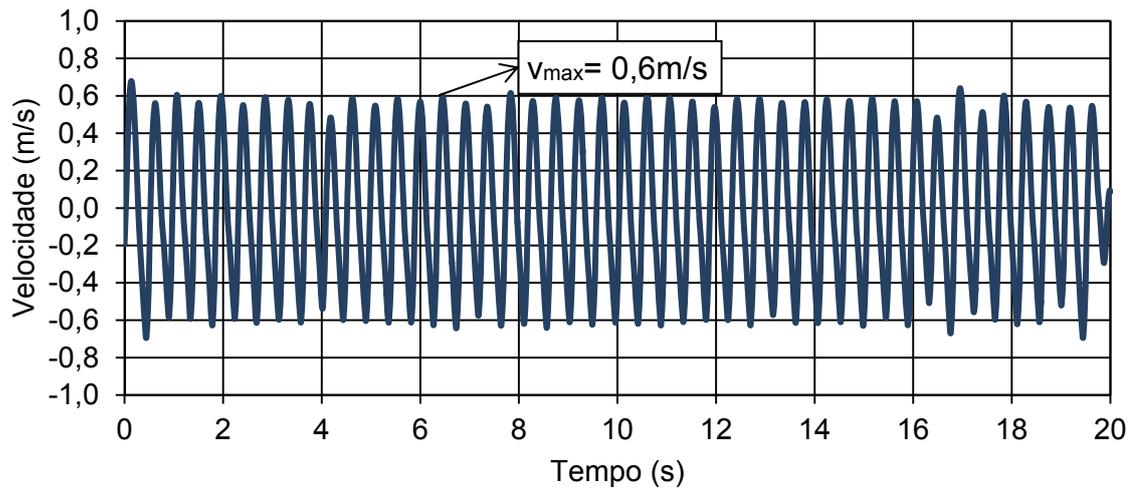


Figura 75- Velocidade no domínio do Tempo. Pessoa com 82,65 kg

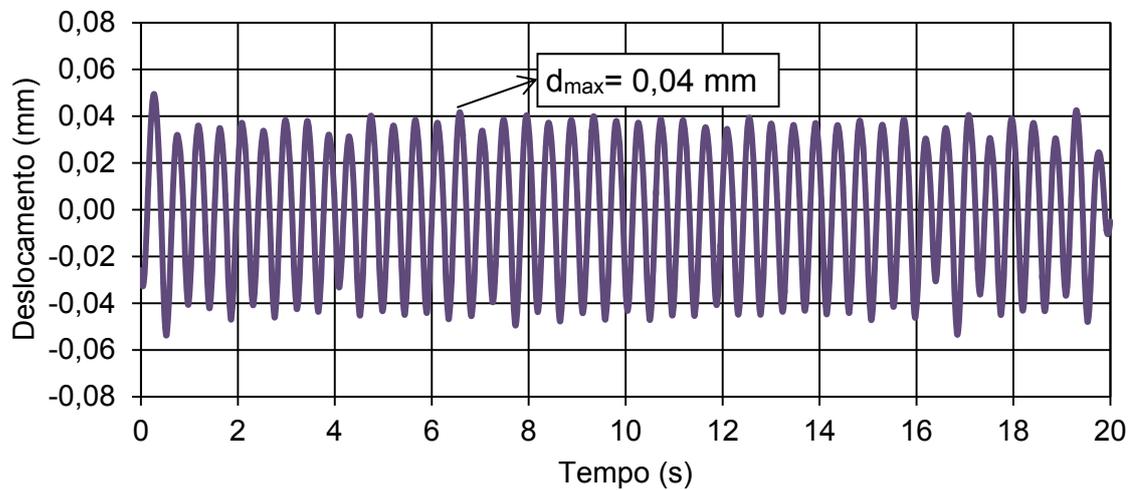


Figura 76 - Deslocamento no domínio do Tempo. Pessoa com 82,65 kg

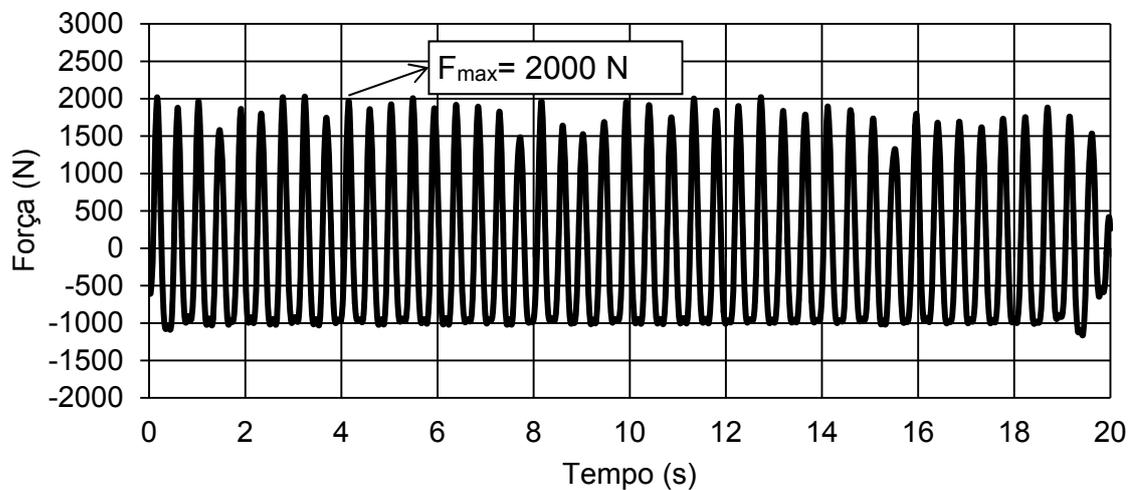


Figura 77 - Força no domínio do Tempo. Pessoa com 99,35 kg

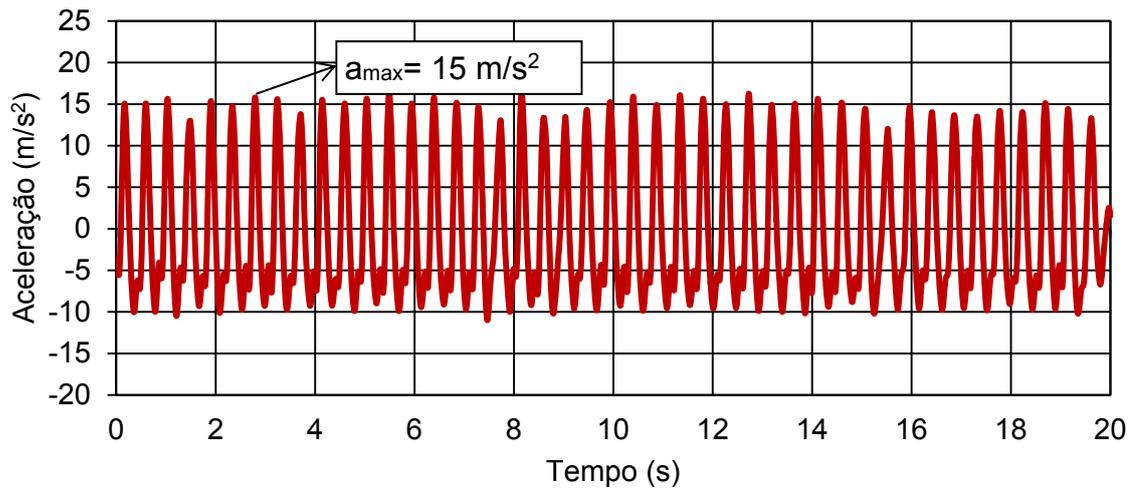


Figura 78 - Aceleração no domínio do Tempo. Pessoa com 99,35 kg

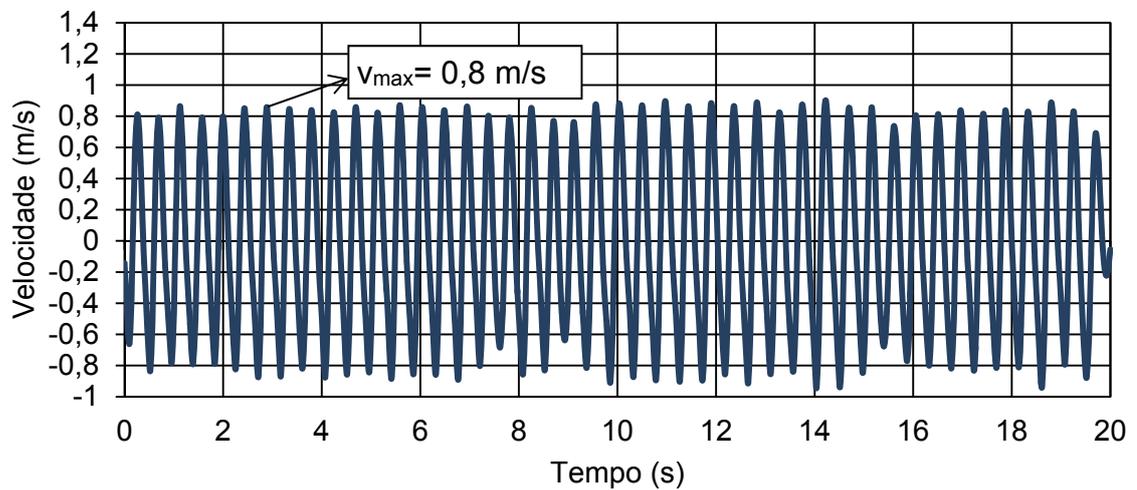


Figura 79 - Velocidade no domínio do Tempo. Pessoa com 99,35 kg

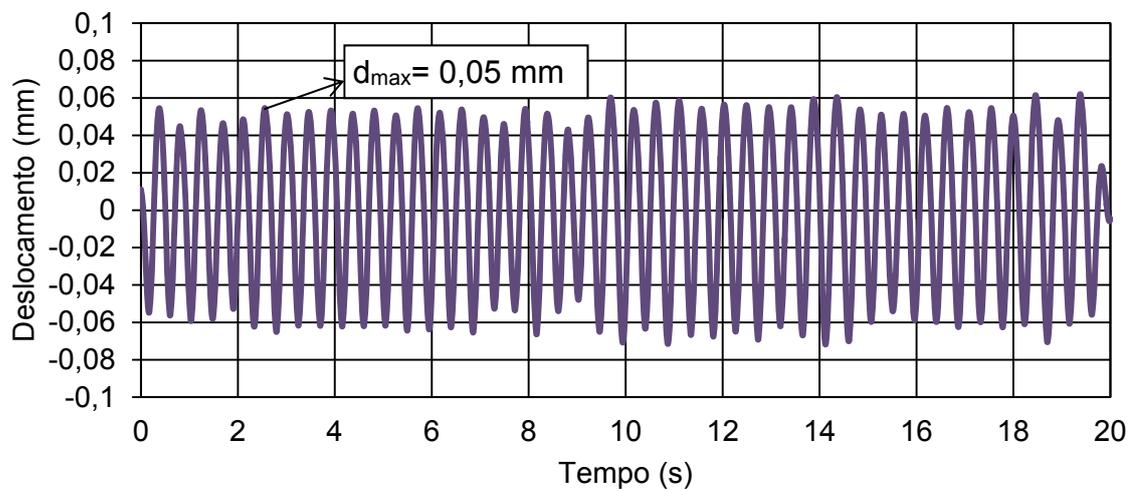


Figura 80 - Deslocamento no domínio do Tempo. Pessoa com 99,35 kg

Nas Figuras 65 a 80, pode ser observado com maior clareza que o aumento da massa da pessoa no ensaio experimental, reflete no crescente aumento da força, aceleração, velocidade e deslocamento do indivíduo. Verifica-se tal conclusão na análise qualitativa presente na Tabela 20.

Tabela 20 - Análise Qualitativa das forças exercidas pelas pessoas

Massa da pessoa (kg)	Força (N)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	Velocidade (m/s)	Deslocamento (mm)
50,2	850	9	0,55	0,03
67,8	1000	9,3	0,56	0,035
82,65	1650	10	0,6	0,04
99,35	2000	15	0,8	0,05

Com base na análise da Tabela 20, nota-se que a força de uma pessoa com massa de 99,35 Kg é 235% maior ao comparar-se com a força da pessoa que possui 50,2 Kg. De forma análoga, observou-se uma diferença igual a 166%, 145% e 166% da aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente entre a pessoa com 99,35 Kg e 50,2 Kg. Neste sentido, pode-se observar uma tendência do aumento da amplitude da força, aceleração, velocidade e deslocamento conforme a massa do ser humano (Kg) aumenta.

#### 3.4.2. Domínio da frequência

A partir dos sinais experimentais no domínio do tempo, realizou-se a transformada rápida de Fourier (FFT) via MATLAB (2009), para obtenção dos sinais no domínio da frequência. Nas Figuras 81 a 88 estão apresentados os espectros da força e aceleração experimental no domínio da frequência.

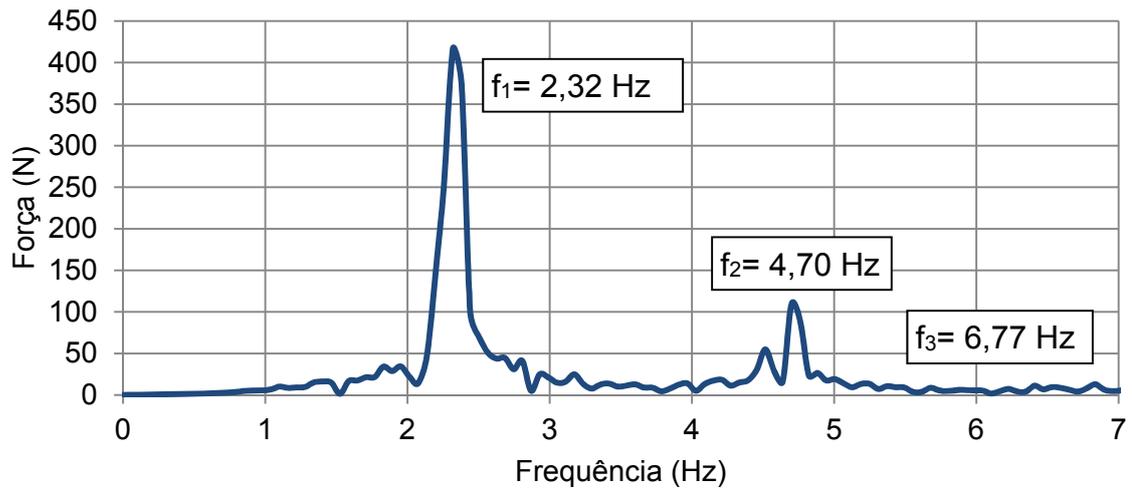


Figura 81 - Força no domínio da frequência. Pessoa com 50,2 kg

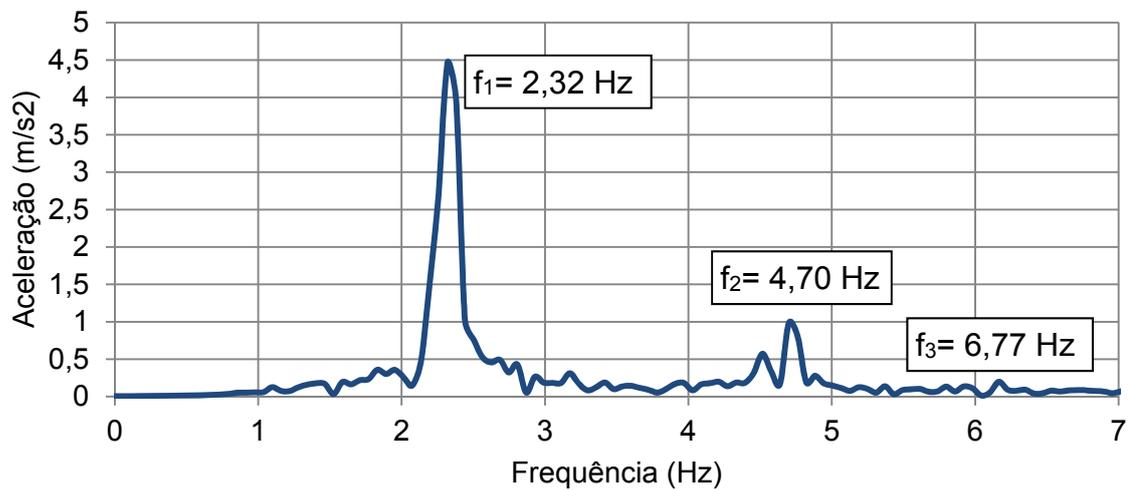


Figura 82 - Aceleração no domínio da frequência. Pessoa com 50,2 kg

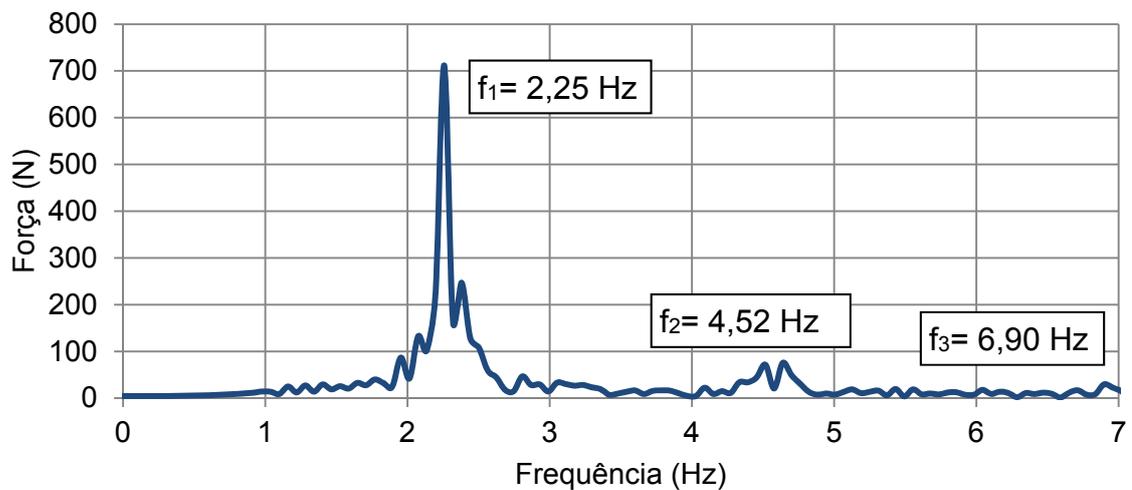


Figura 83 - Força no domínio da frequência. Pessoa com 67,8 kg

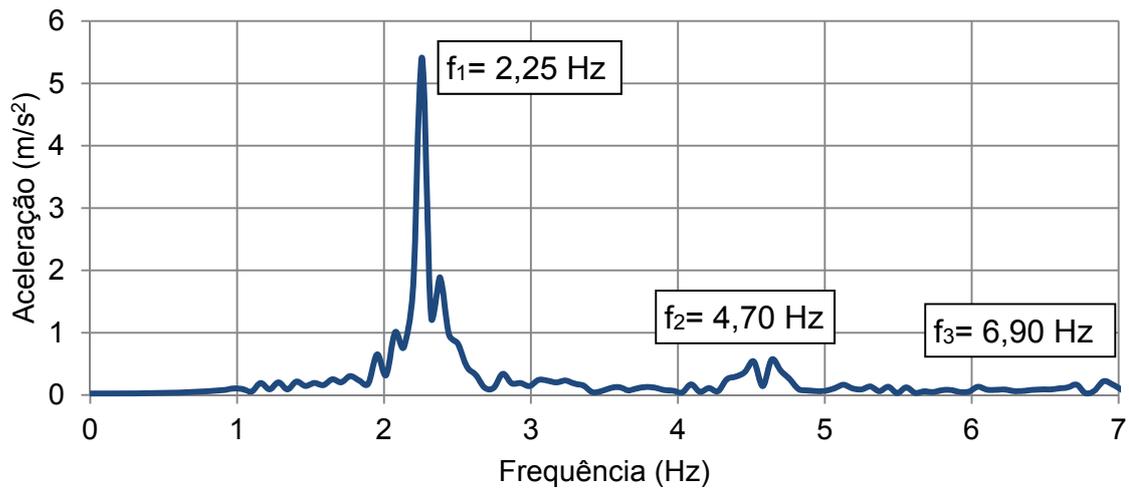


Figura 84 - Aceleração no domínio da frequência. Pessoa com 67,8 kg

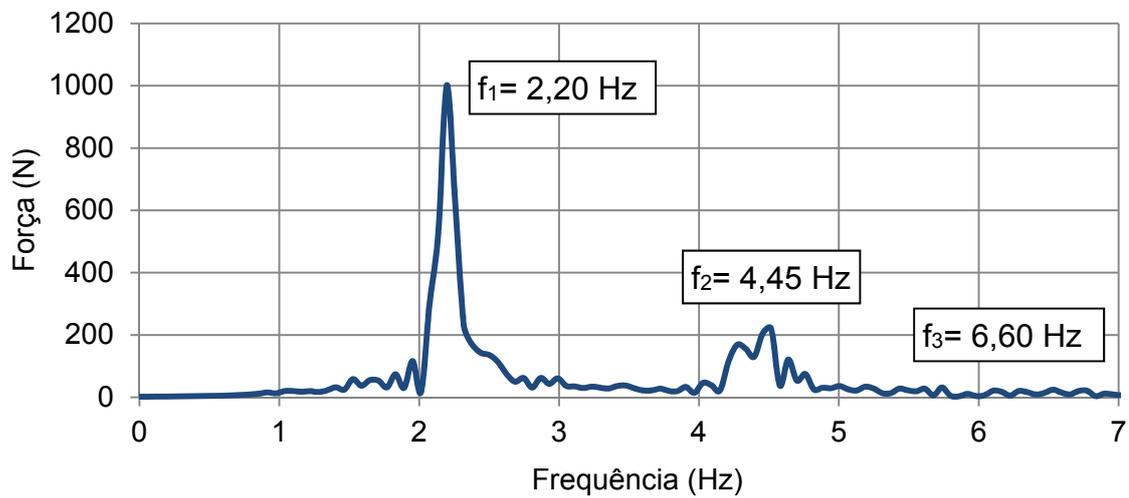


Figura 85 - Força no domínio da frequência. Pessoa com 82,65 kg

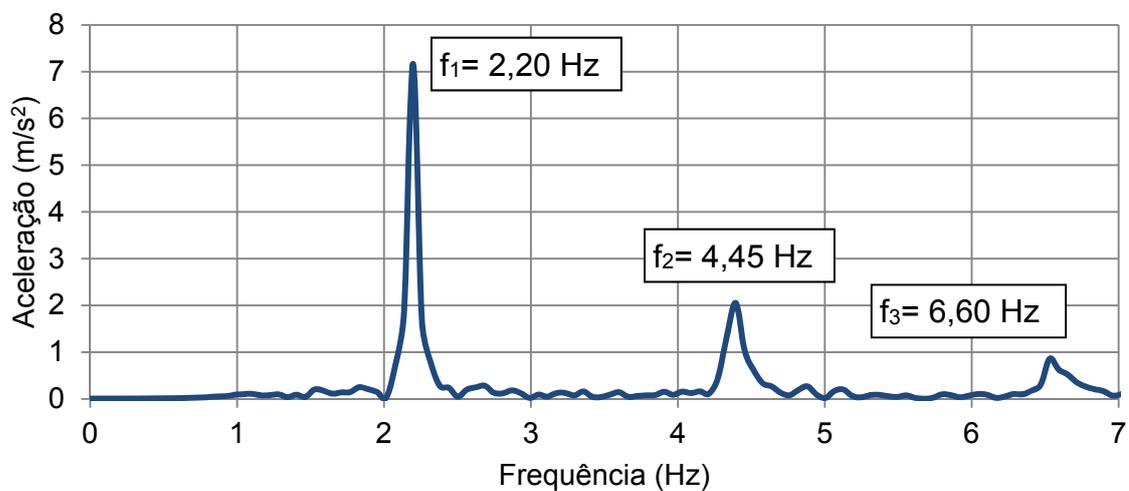


Figura 86 - Aceleração no domínio da frequência. Pessoa com 82,65 kg

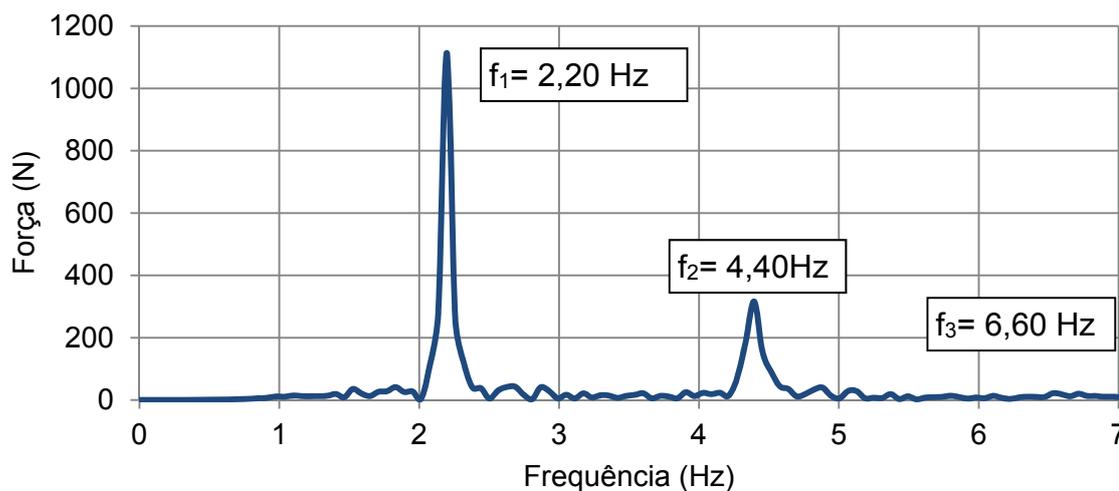


Figura 87 - Força no domínio da frequência. Pessoa com 99,35 kg

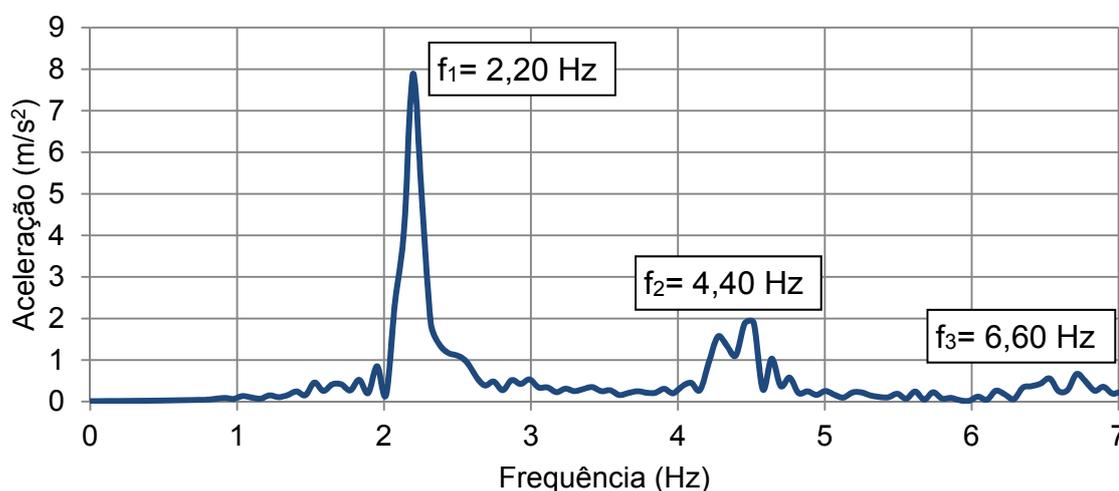


Figura 88 - Aceleração no domínio da frequência. Pessoa com 99,35 kg

Nota-se que a maior transferência de energia ocorre no primeiro pico, correspondente a frequência da excitação da atividade humana nos ensaios experimentais ( $f=2,20$  Hz), através da análise das Figuras 81 a 88. Entretanto, apesar do estímulo para a realização de saltos sob a frequência de 2,20 Hz, as pessoas com massas de 50,2 Kg e 67,8 Kg não conseguiram alcançar essa frequência, sendo notado que alcançaram as frequências de 2,32 Hz e 2,25 Hz, respectivamente. Deste modo, é possível concluir que durante a prática de atividade aeróbica sob frequências definidas, seja pelos movimentos ou estímulos sonoros, há pessoas que encontram-se fora do ritmo desejado e conseqüentemente ocorre uma defasagem dos movimentos executados. Além disso, observa-se que as amplitudes

de respostas da força e aceleração são crescentes à medida que aumenta a massa corporal do indivíduo.

### 3.5. Considerações finais

Este capítulo descreveu os testes experimentais desenvolvidos em laboratório, com base na utilização dos equipamentos de monitoração dinâmica. Além disso, a estratégia desenvolvida para a determinação das características relativas ao comportamento dinâmico do ser humano foi apresentada. Por fim, foram divulgados espectros relacionados à força, aceleração, velocidade e deslocamento, no domínio do tempo e da frequência de 4 (quatro) das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios experimentais, com o objetivo de exemplificar as respostas dinâmicas obtidas.

## 4 MODELAGEM DO SISTEMA BIODINÂMICO PROPOSTO

### 4.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta o modelo biodinâmico proposto neste trabalho de pesquisa, com base na validação experimental e numérica do modelo biodinâmico proposto. A representação das ações dinâmicas através do modelo biodinâmico simula de modo mais realista o comportamento do ser humano, entretanto, modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força dura”) ainda são bastante utilizados na análise dinâmica de sistemas estruturais. Os sistemas biodinâmicos são caracterizados por um sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (1GL), onde considera-se a interação dinâmica ser humano-estrutura.

Estudos recentes demonstram que a modelagem biodinâmica representa de maneira mais realista as ações dinâmicas humanas (CAPPELLINI, 2015; JOINT WORKING GROUP, 2008; JONES et al., 2011; SHAHABPOOR; PAVIC; RACIC, 2016; VAN NIMMEN, 2015; TOSO et al., 2016). Os modelos biodinâmicos podem simular diversas posturas e movimentos do corpo humano, tais como pessoa parada, em pé, sentada, pulando ou correndo.

As características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) são determinadas através do processo numérico de otimização, via utilização de Algoritmos Genéticos (AG) por meio do programa MATLAB (2017), a partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados e descritos no capítulo 3.

### 4.2 Modelo biodinâmico proposto

Nesta tese, o modelo biodinâmico proposto é definido um sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), tendo em mente representar de forma mais fidedigna as ações humanas rítmicas sobre uma estrutura, de acordo com a realidade de projeto. A escolha deste modelo encontra-

se alinhada aos modelos propostos por Campista e Silva (2018b), Shahabpoor et al. (2017) e Pavic e Racic (2016).

O modelo biodinâmico proposto, submetido à aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo sobre o grau de liberdade da massa do sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), e, além disso, a uma força aplicada diretamente sobre o sistema estrutural foi simulado numericamente via programa computacional ANSYS. Para tal, utilizou-se o elemento COMBIN40 para representar o sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), além de aplicar os sinais no domínio do tempo, referente à aceleração, velocidade e deslocamento obtidos experimentalmente (capítulo 3) sobre a massa do elemento COMBIN40, e por fim, a força experimental (capítulo 3) sobre a estrutura, simulando os testes experimentais (capítulo 3) realizados por algumas pessoas, de forma numérica (via programa ANSYS) para validar o modelo biodinâmico proposto. Deste modo, a Figura 90 apresenta os resultados referentes a uma pessoa, de modo que se observou uma excelente correlação das acelerações experimentais e numéricas no domínio do tempo e frequência, consequentemente validando o modelo biodinâmico proposto.

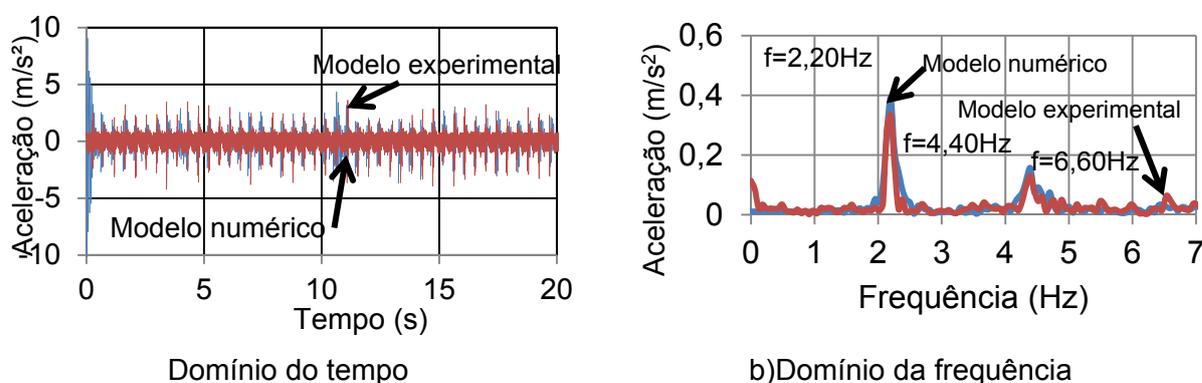


Figura 89 - Validação do modelo biodinâmico proposto

É importante enfatizar que os valores da força, aceleração, velocidade e deslocamento das pessoas foram obtidos com base nos testes experimentais descritos no capítulo 3. A Figura 90 ilustra a representação genérica acerca da modelagem dos sistemas biodinâmicos propostos e validado através da modelagem numérica dos ensaios experimentais realizados e descritos no capítulo 3.

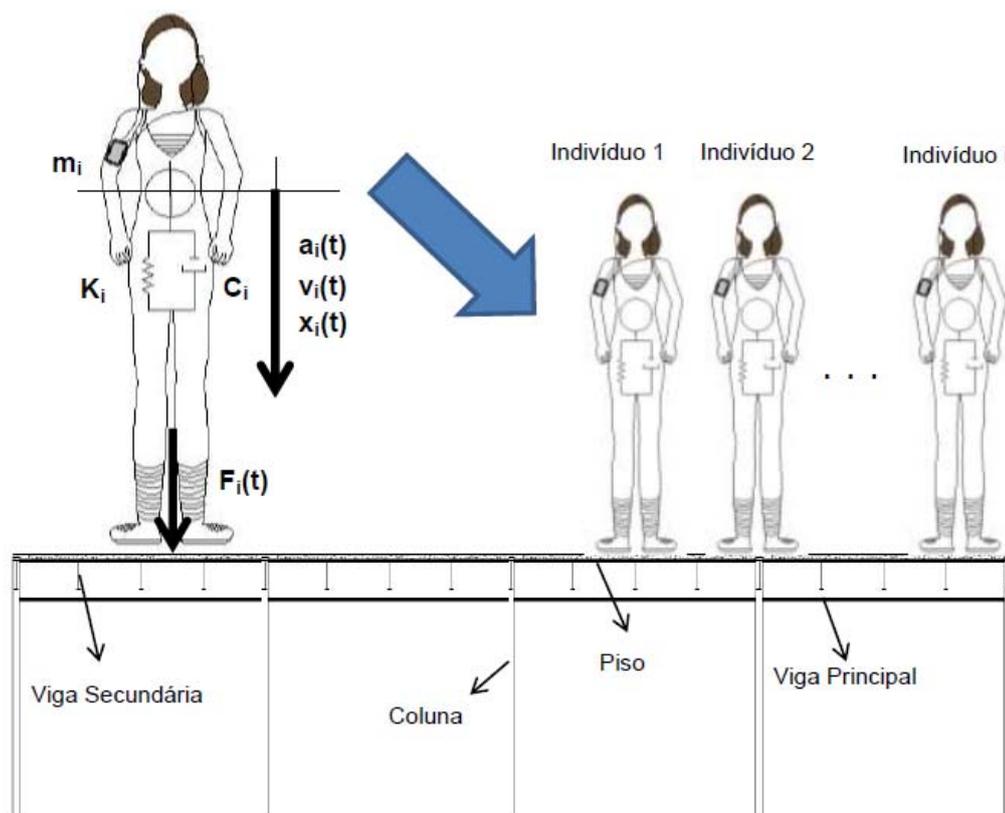


Figura 90 - Representação das pessoas modeladas com sistemas biodinâmicos com 1GL

#### 4.3 Definição do problema de otimização

A otimização é caracterizada pelo conjunto de procedimentos que buscam minimizar uma determinada função, denominada função objetivo, sujeita ou não a restrições. Deste modo, este trabalho de pesquisa tem o propósito de determinar as características dinâmicas do modelo biodinâmico, ou seja, rigidez ( $k_i$ ) e amortecimento ( $c_i$ ) do ser humano ilustrado na Figura 90. Em relação à massa do indivíduo ( $m_i$ ), considera-se a massa total determinada através da pesagem realizada durante os ensaios experimentais descritos no capítulo 3, tal consideração se baseia nos trabalhos apresentados no capítulo 2. A função objetivo apresentada no problema de otimização se refere a equação (32), de modo que maiores detalhes sobre a função encontram-se no item 4.3.2 deste trabalho.

#### 4.3.1 Método de otimização: Algoritmo genético via Matlab

O algoritmo genético é a metodologia de otimização global que visa à 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. Durante os anos 80, David E. Goldberg, aluno de Holland, obteve seu primeiro sucesso ao utilizar o método em aplicação industrial com Algoritmo Genético (AG).

Esta metodologia é uma família de técnicas de busca estocásticas fundamentada na teoria da evolução de Darwin (DIANATI et al., 2002) com o objetivo de obter a melhor solução possível do problema de otimização. Deste modo, o AG simula os processos naturais de sobrevivência e reprodução das populações, essenciais em sua evolução. 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), esses 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 aptidão, com base na função objetivo, de modo que cada cromossomo recebe um valor de aptidão 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 aptidão 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. A Figura 91 ilustra o desenvolvimento das quatro etapas descritas anteriormente. É possível fazer uma analogia entre os Algoritmos Genéticos e princípios da evolução das espécies segundo Darwin, através da Tabela 21.

Tabela 21 - Analogia entre Natureza e Algoritmo Genético (AG)

Natureza	Algoritmo Genético (AG)
População	Conjunto de soluções do problema
Indivíduo	Uma solução possível dentre o conjunto de soluções
Geração	Número de iterações que o AG executa

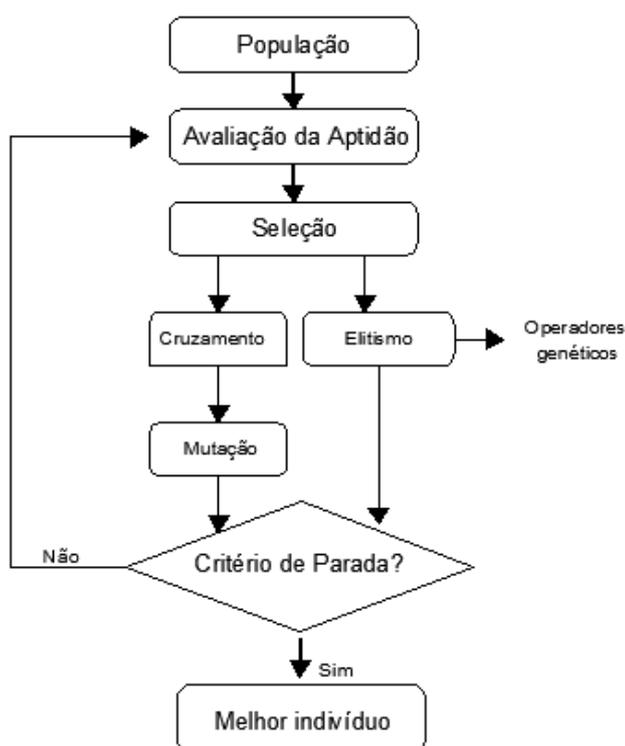


Figura 91 - Estrutura básica de um algoritmo

#### 4.3.1.1 Parâmetros utilizados na otimização via algoritmo genético (AG)

Em relação à utilização dos AGs, no âmbito deste trabalho de pesquisa, foram aplicados limites inferiores e limites superiores nas variáveis (amortecimento e rigidez) a serem obtidas pela otimização, objetivando limitar a solução da função objetivo. Desse modo, as equações (29) e (30) 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. A determinação dos limites superiores foi realizada tomando como base pesquisas realizadas por alguns autores (ISO 7962, 1987; HOTHAN, 1999; FALATI, 1999; BROWNJOHN, 1999, 2001; ZHENG; BROWNJOHN,2001;MATSUMOTO; GRIFFIN, 2003; OLIVEIRA et al., 2014), sendo o limite superior para a rigidez igual a 120.000N/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.

$$k_i = 4\pi^2 f_i^2 m_i \quad (29)$$

$$c_i = 4\pi m_i \xi f_i \quad (30)$$

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).

Além disso, com base nas informações presentes na Tabela 21 e Figura 91, foram considerados valores para os seguintes parâmetros: tamanho da população igual a 200, 100 gerações, taxa de cruzamento de 0,75 e elitismo igual a 2. Em relação à metodologia utilizada no processo de seleção, mutação e cruzamento, foram escolhidas “Stochastic uniform”, “Adaptive Feasible” e “Two point”, respectivamente. Desta forma, baseando-se nestes parâmetros, metodologias e na função objetivo (Equação (32)), realiza-se a otimização para obtenção das características dinâmicas do ser humano.

#### 4.3.2 Aplicação do método de otimização

No que concerne à determinação das características dinâmicas das pessoas com base no emprego dos algoritmos genéticos (AG), via uso do programa MATLAB, faz-se necessária à solução da equação de equilíbrio dinâmico [Equação (31)].

$$F_i(t) = k_i \cdot x_i(t) + c_i \cdot v_i(t) + m_i a_i(t) \quad (31)$$

Onde  $F_i(t)$ : força produzida pelo indivíduo  $i$  (N);  $k_i$ : 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>).

Vale a pena destacar que o parâmetro “ $m_i$ ” é determinado através da pesagem de cada indivíduo durante os ensaios experimentais, descritos no capítulo 3. É necessário minimizar a função objetivo, denominada “ $f_{obj}$ ”, apresentada na equação (32) para encontrar a solução da equação (32). A função objetivo ( $f_{obj}$ ) é composta pelo parâmetro  $corr\_1$  (Equação (33)), sendo tal parâmetro definido como a correlação entre a força experimental (Equação (34)) e a força otimizada (Equação (35)).

$$f_{obj} = 1 - (corr\_1)^2 \quad (32)$$

$$corr\_1 = corr(F_d, F_{d1}) \quad (33)$$

$$F_{d1} = F_{exp} - m \cdot accel_{fpa\ 1} \quad (34)$$

$$F_{d0} = x(1) \cdot vel_{fpa\ 1} + x(2) \cdot desl_{fpa\ 1} \quad (35)$$

Onde  $corr\_1$ : correlação entre forças;  $f_{obj}$ : função a ser minimizada através do AG;  $F_{d0}$ : força otimizada do indivíduo (N);  $F_d$ : força otimizada do indivíduo a parcela menos  $m \cdot accel_{fpa\ 1}$  (N);  $F_{d1}$ : força experimental do indivíduo menos a parcela  $m \cdot accel_{fpa\ 1}$  (N);  $F_{exp}$ : força experimental do indivíduo;  $m$ : massa do indivíduo determinada pela pesagem;  $accel_{fpa1}$ : aceleração experimental do indivíduo;  $vel_{fpa1}$ : velocidade experimental do indivíduo;  $desl_{fpa1}$ : 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.

Destaca-se que as acelerações foram coletadas experimentalmente e a velocidade e o deslocamento foram obtidos via integração do sinal experimental da aceleração. Cabe ressaltar que filtros do tipo “passa-alta” e “passa-baixa” foram utilizados para a filtragem (limpeza) dos sinais das acelerações, velocidades e deslocamentos [1 Hz < fs < 8 Hz; fs: frequência do sinal].

A partir da observação da função objetivo, nota-se a importância da correlação entre a força experimental e otimizada. É importante mencionar que correlação é a relação entre duas ou mais variáveis, de maneira que quando uma varia a outra varia também. Neste sentido, utilizou-se o coeficiente de Pearson (r) [Triola, 2008] para avaliar o grau de associação linear entre as duas variáveis [força otimizada e experimental]. Quando o valor do coeficiente de Pearson (r) for mais próximo de 1,0, 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 (36).

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (36)$$

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

#### 4.3.3 Valores dos parâmetros biodinâmicos

A Tabela 22 apresenta as características dinâmicas dos modelos biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) após o processo de minimização da função objetivo (Equação (25)), 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 22 - 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 23 apresenta os valores estatísticos (média, média quadrática, variância e desvio padrão) das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento), referentes aos 100 (Cem) ensaios experimentais realizados e descritos no capítulo 3.

Tabela 23 - 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 determinação da média e da média quadrática é importante para apontar aonde 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.

Além disso, realizou-se o cálculo do coeficiente de variação, definida como a relação entre o desvio padrão e a média, com o intuito de avaliar a variação das características dinâmicas (massa, rigidez e amortecimento). Consequentemente, através dos resultados presentes na Tabela 23, verificou-se que a massa apresenta o menor coeficiente de variação quando comparada ao amortecimento e a rigidez.

A pequena variação nos valores de massa é justificada pela aleatoriedade da escolha das pessoas participantes dos ensaios experimentais, enquanto 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 resistência física e a forma que cada pessoa pratica a atividade humana rítmica (atividades aeróbicas).

Na sequência, a partir da obtenção das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos, e também dos valores da aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo para 100 (Cem) indivíduos distintos, obteve-se a força dinâmica otimizada para cada um dos testes experimentais realizados, através da implementação dessas informações na equação de equilíbrio dinâmico (Equação (28)). Desta maneira, torna-se possível determinar 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).

Com o intuito de validar a força otimizada, comparou-se o espectro da força otimizada com o espectro da força experimental de 2 (Duas) das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios. Os espectros obtidos são ilustrados nas Figuras 92 e 93.

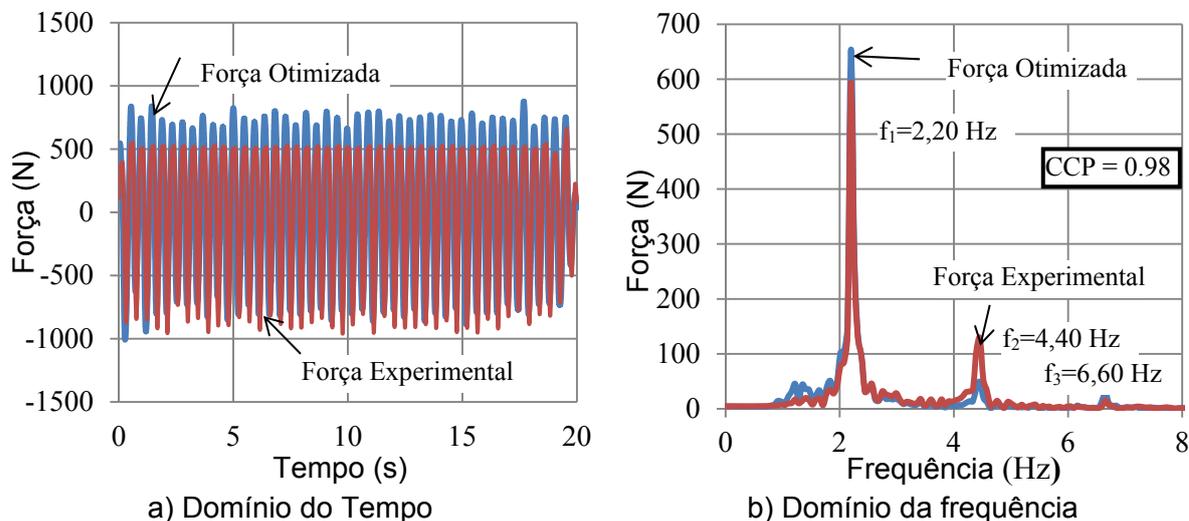


Figura 92 - Parâmetros biodinâmicos otimizados. Pessoa com 51,55 Kg de saltando sob a frequência de 2,20 Hz

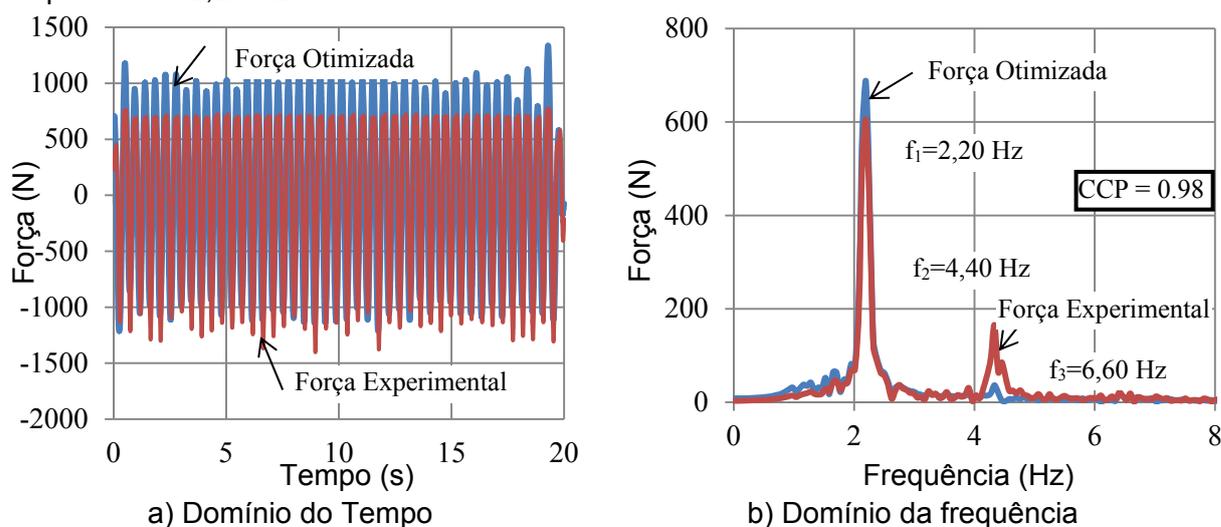


Figura 93 - Parâmetros biodinâmicos otimizados. Pessoa com 64,80 Kg saltando sob a frequência de 2,20 Hz

Conforme observado nas Figuras 92 e 93, é possível verificar uma correlação satisfatória entre a força experimental e a força otimizada, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, o que demonstra que a força otimizada encontrada se ajusta a força obtida nos ensaios experimentais realizados. Tal conclusão também foi verificada para os 100 (Cem) testes experimentais realizados, sendo apresentados na Tabela 24. Os valores do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) obtidos para todos os 100 (Cem) ensaios experimentais realizados encontram-se no Apêndice B.

Tabela 24 - Correlação de Pearson (r) das pessoas 1 a 25

Pessoa	Coeficiente de Pearson (r) entre $F_{d1}$ x $F_d$	
	Domínio da frequência	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

Segundo Mukaka (2012), o valor da correlação dentro de uma faixa de 0,7 a 0,9 indica uma forte relação entre as variáveis. Logo, nota-se que tanto as correlações entre as forças experimentais e otimizadas no domínio do tempo, quanto

no domínio da frequência apresentam valores que expressam uma excelente relação entre as forças, principalmente no domínio da frequência.

Os valores do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) presentes na Tabela 24, assim como os espectros presentes nas Figuras 92 e 93, indicam uma correlação satisfatória entre a força obtida experimentalmente e a força otimizada, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

#### 4.3.4 Relação entre os parâmetros biodinâmicos via regressão linear

A regressão linear é caracterizada pela realização de uma análise estatística com o objetivo de verificar a existência de uma relação entre uma variável dependente com uma variável independente, ou seja, a determinação de uma equação que explique a variação de uma variável em função dependente de outra variável independente.

Neste contexto, este trabalho de pesquisa verifica a correlação entre as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos [massa ( $m_i$ ), rigidez ( $k_i$ ) e amortecimento ( $c_i$ )], através da utilização do método dos mínimos quadrados. Para tal, somente as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos das 20 (Vinte) pessoas que apresentaram os maiores valores de coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) foram selecionadas (ver apêndice B). Deste modo, o valor do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) para as relações rigidez-massa, amortecimento-rigidez e amortecimento-massa, considerando os dados obtidos das referidas vinte pessoas foram determinadas e encontram-se apresentadas na Tabela 25.

A tabela 26 apresenta as expressões matemáticas encontradas, além do valor do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) 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 94 a 96 representam graficamente as relações rigidez-massa, amortecimento-rigidez e amortecimento-massa.

Tabela 25 - Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as variáveis

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

Tabela 26 - Dados obtidos a partir de regressões

Expressão matemática	R <sup>2</sup>	Coeficiente de Pearson (r) (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

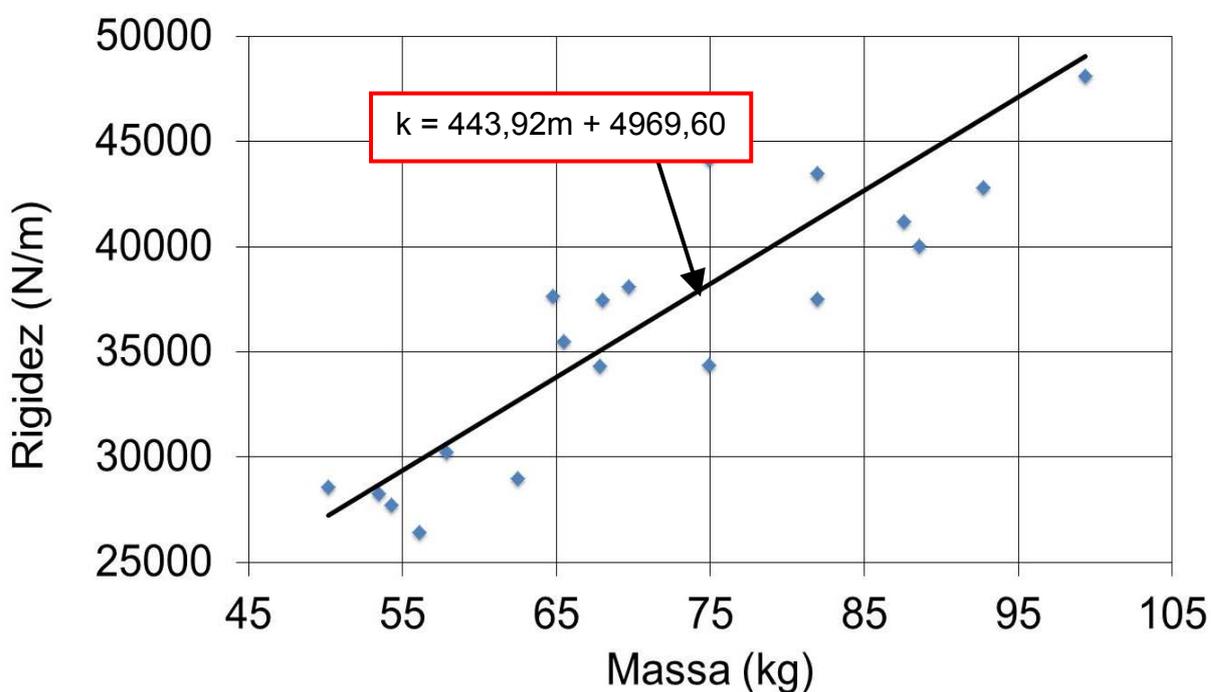


Figura 94 - Relação Rigidez x Massa

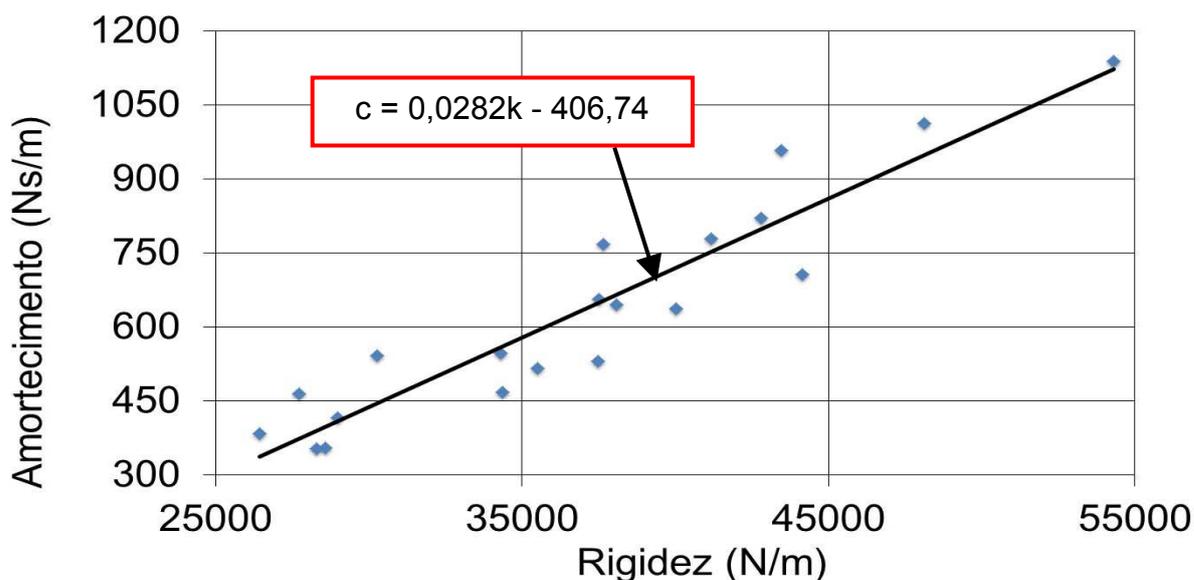


Figura 95 - Relação Amortecimento x Rigidez

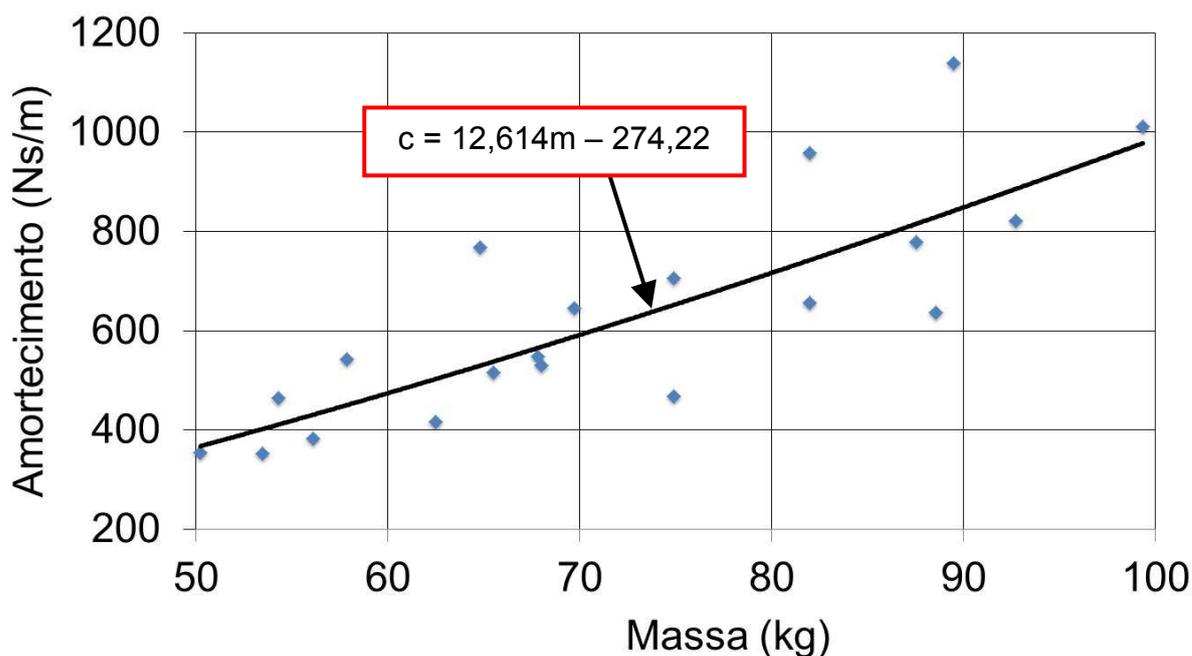


Figura 96 - Relação Amortecimento x Massa

As Tabelas 25 e 26 indicaram uma correlação satisfatória entre as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento), especialmente a relação entre amortecimento e rigidez, através dos valores dos coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) e do  $R^2$  apresentados. As Figuras 93 a 95 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.

#### 4.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou um modelo biodinâmico para representar as ações dinâmicas do ser humano ao praticar atividades aeróbicas. As características dinâmicas do modelo biodinâmico (rigidez e amortecimento) foram determinadas através da resolução do problema de otimização, aplicando o método dos Algoritmos Genéticos (AG) via emprego do programa MATLAB (2017). Posteriormente, foram obtidos os coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) para as relações força experimental *versus* força otimizada, além das relações entre as características dinâmicas (massa, rigidez e amortecimento) com o objetivo de validar os resultados obtidos. Deste modo, verificou-se a existência de uma relação entre as características dinâmicas dos modelos biodinâmicos, de tal forma que determinou-se uma expressão matemática entre as mesmas.

## 5 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

### 5.1 Considerações iniciais

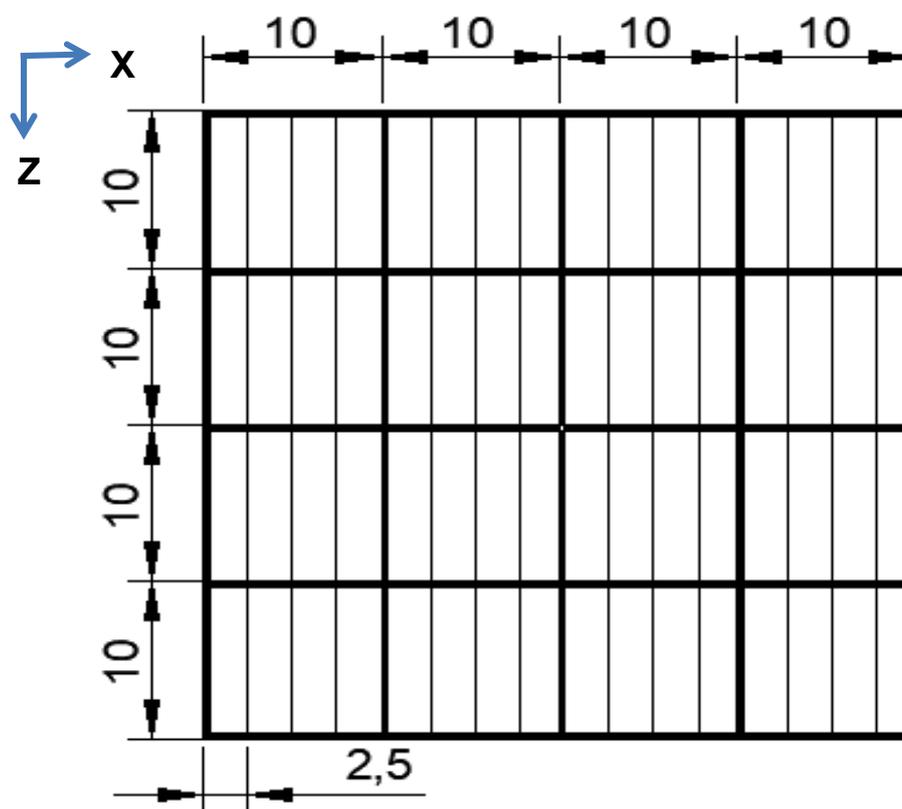
Este capítulo aborda a apresentação do sistema estrutural do piso misto investigado, através da descrição de suas propriedades físicas referentes aos materiais constituintes e geometria. O piso misto avaliado é um modelo real formado por uma laje que se apoia sobre vigas e pilares de aço trabalhando em regime de interação total. Em relação às ligações estruturais existentes, considera-se que o tipo viga-coluna e tipo viga-viga são rígidos e flexíveis, respectivamente. Além disso, os materiais que constituem o sistema estrutural (aço e concreto) trabalham no regime elástico-linear.

### 5.2 Modelo estrutural do piso

O sistema estrutural do piso é composto pela laje de concreto armado, vigas (principais e secundárias) e pilares de perfis metálicos. O piso misto possui dimensões (eixo a eixo de pilares) de 40 x 40 m, área de 1600 m<sup>2</sup> e pilares com pé-direito de 4 m, conforme ilustração das Figuras 97 e 98. As vigas que se apoiam sobre pilares são ditas vigas principais, e aquelas que se apoiam sobre vigas principais são chamadas de vigas secundárias.

Os perfis metálicos utilizados nos elementos constituintes do piso misto, como as vigas principais e secundárias, são respectivamente W 610 x 140 e W 460 x 60, enquanto os pilares são representados pelo perfil HP 250 x 85. A Tabela 27 apresenta as propriedades geométricas dos perfis metálicos utilizados, enquanto a seção genérica do perfil utilizado é representada na Figura 99. Em relação às suas propriedades físicas, os perfis metálicos são constituídos por um aço com tensão de escoamento de 345 MPa e módulo de elasticidade (E) de 205 MPa, e a laje de concreto armado possui espessura de 10 cm, resistência característica à

compressão ( $f_{ck}$ ) de 30 MPa e módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) de 26 MPa. O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) utilizado para o aço e o concreto é de 0,3 e 0,2; respectivamente (NBR 8800,2008).



a) Vista superior. (dimensões em metros)



b) Perspectiva do modelo estrutural

Figura 97 - Modelo estrutural do piso misto (aço-concreto)

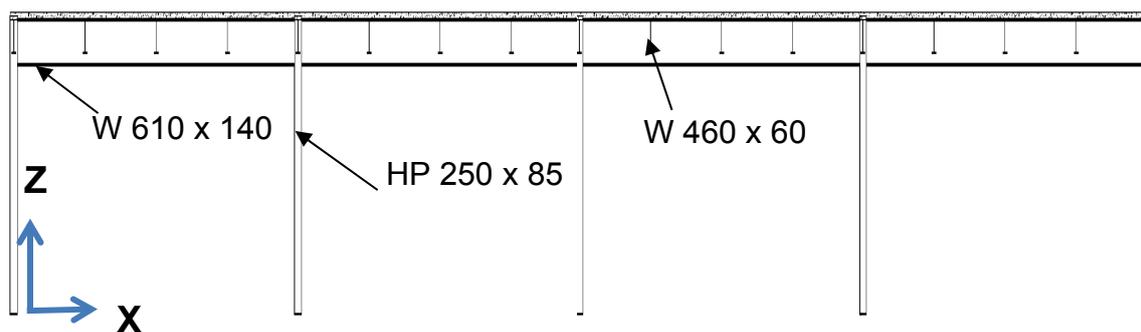


Figura 98 - Vista lateral do piso misto (aço-concreto)

Tabela 27 - Características geométricas das vigas e colunas (dimensões em milímetros)

Tipo de perfil	Altura (d)	Largura da mesa (b <sub>f</sub> )	Espessura da mesa superior (t <sub>f</sub> )	Espessura da mesa inferior (t <sub>i</sub> )	Espessura da alma (t <sub>w</sub> )
Viga - W 610 x 140	617	230	22,2	22,2	13,1
Viga - W 460 x 60	455	153	13,3	13,3	8,0
Coluna - HP 250 x 85	254	260	14,4	14,4	14,4

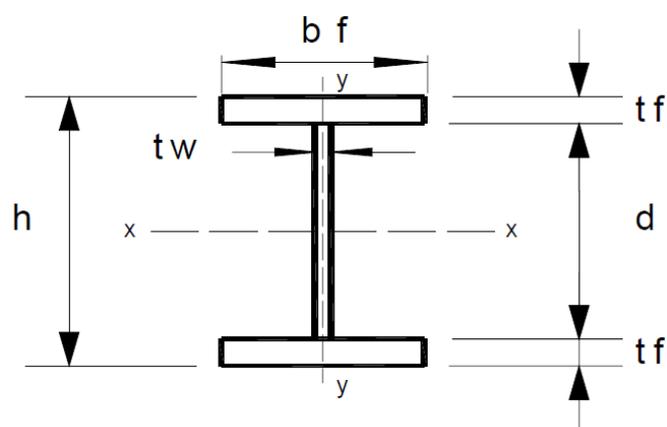


Figura 99 - Seção genérica dos perfis metálicos

### 5.3 Considerações finais

O modelo estrutural se refere a um piso misto (aço-concreto), apresentado com as características necessárias para o desenvolvimento da modelagem numérico-computacional do sistema estrutural.

## 6 MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL

### 6.1 Considerações iniciais

A modelagem numérico-computacional do piso misto (aço-concreto) foi desenvolvida via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa ANSYS (2009). Este modelo representa da forma mais real possível, o comportamento estrutural do piso misto estudado, e também as características do ser humano através dos modelos biodinâmicos, no intuito de utilizá-lo na análise modal (vibração livre) e de vibração forçada, onde será avaliado o comportamento dinâmico da estrutura. O presente capítulo aborda a discretização em elementos finitos do modelo estrutural e as simplificações consideradas.

### 6.2 Modelagem numérico-computacional do sistema estrutural investigado

No que tange à concepção do modelo numérico em elementos finitos do piso misto (aço-concreto) investigado neste estudo, considera-se que os materiais aço e concreto apresentam um comportamento linear-elástico, e que as seções estruturais permanecem planas no estado deformado. Destaca-se, ainda, que a interação completa entre laje de concreto e as vigas de aço foi considerada ao longo das análises, ou seja, os nós entre as vigas de aço e as lajes de concreto são acoplados de maneira a impedir a ocorrência de quaisquer deslizamentos.

O piso misto investigado é constituído por vigas, pilares e laje, de tal forma que as vigas e as colunas de aço dos modelos são simuladas por elementos finitos de viga tridimensionais BEAM44, enquanto a laje de concreto é simulada por meio de elementos finitos de casca SHELL63. As ligações viga-viga e viga-coluna foram modeladas pelo emprego do elemento COMBIN7 e COMBIN39, respectivamente. Finalmente, utilizou-se o elemento COMBIN40 para simular as características dinâmicas do ser humano presentes no piso misto.

O modelo do piso misto resultou em uma estrutura com 29874 nós, 3920 elementos tridimensionais de viga, 25600 elementos de casca, e 167069 graus de liberdade, de acordo com o modelo numérico desenvolvido no programa ANSYS (2009). A representação do piso misto está ilustrada nas Figuras 100 a 104.

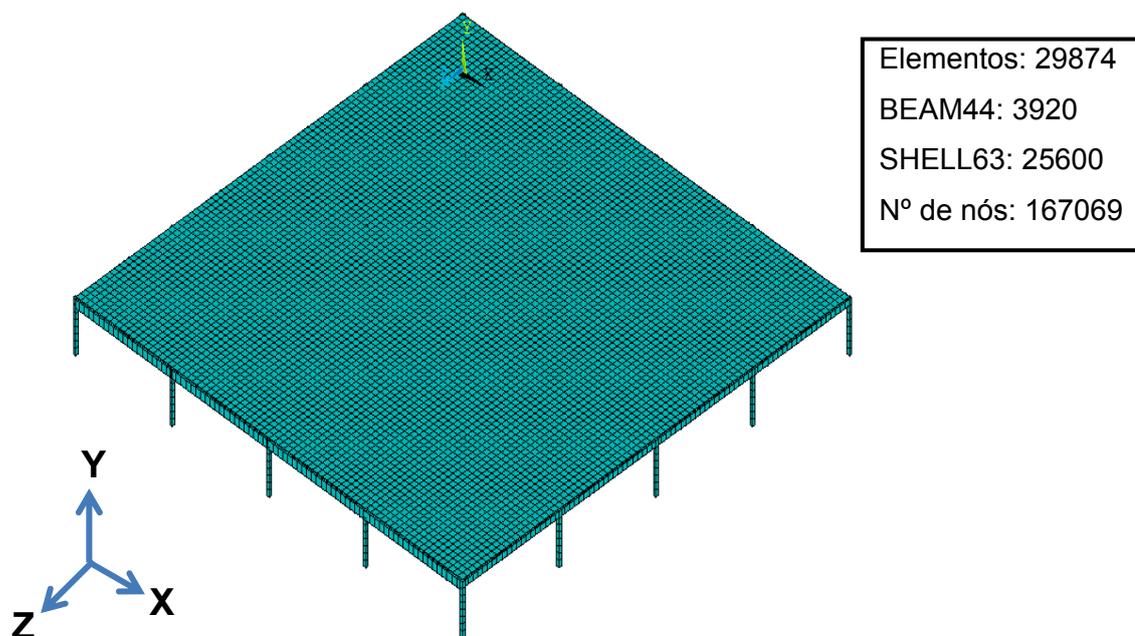


Figura 100 - Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto) (ANSYS, 2009)

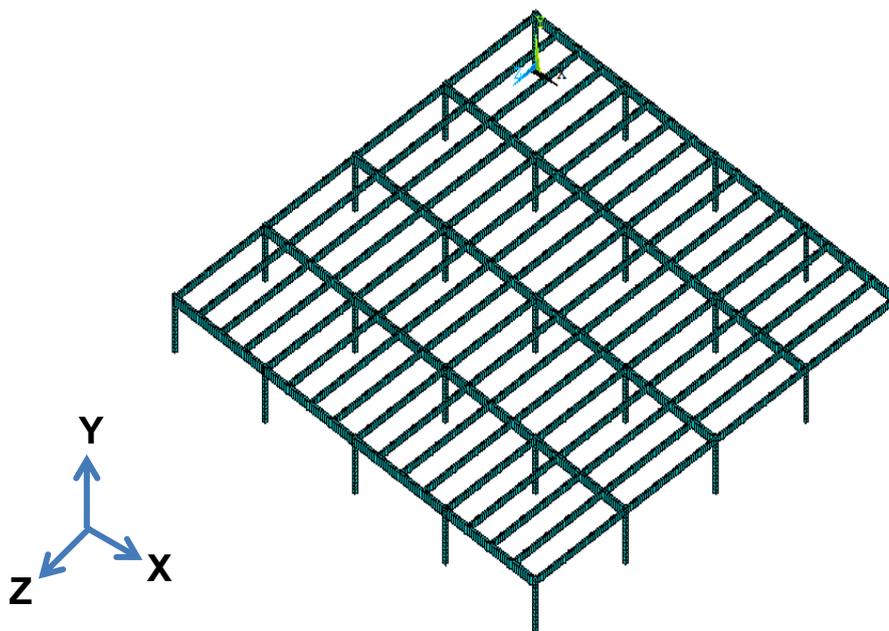


Figura 101 - Vista isométrica do modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto) (ANSYS, 2009)

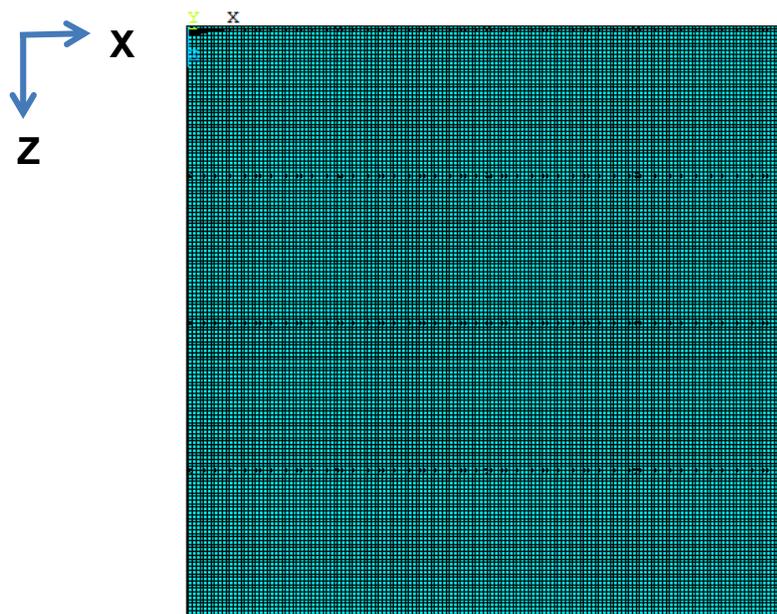


Figura 102 - Vista superior do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2009)

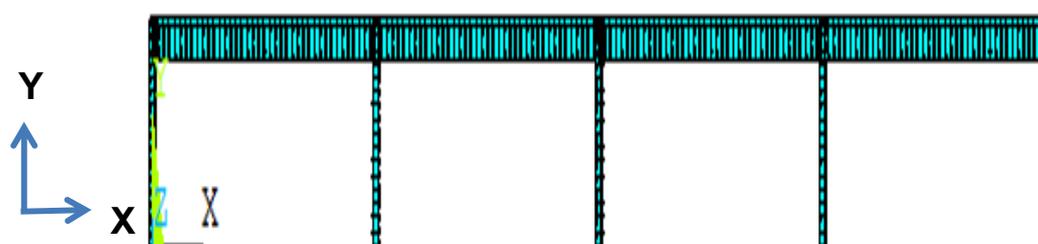


Figura 103 - Vista do plano XY do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2009)

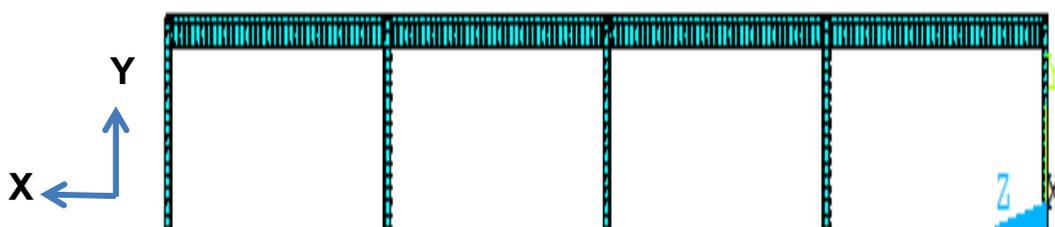


Figura 104 - Vista do plano ZY do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2009)

### 6.3 Elementos finitos utilizados

O elemento BEAM44 é um elemento uniaxial que expressa a capacidade de tensão, flexão nos nós I e J. O elemento possui seis graus de liberdade em cada nó,

sendo três translações e três rotações nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Ele permite a utilização de qualquer tipo de seção transversal, desde que se definam as propriedades necessárias para tal. Os eixos principais  $y$  e  $z$  estão localizados na seção transversal. A Figura 105 representa o elemento BEAM44.

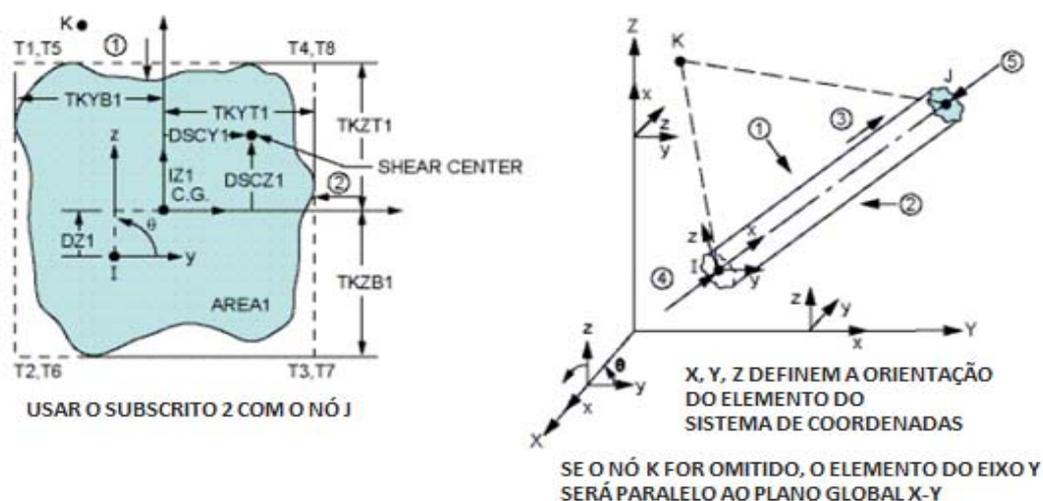


Figura 105 - Elemento BEAM44 (ANSYS, 2009)

O elemento SHELL63, conforme mostrado na Figura 106, é definido por quatro nós. Este elemento considera os efeitos de flexão e membrana, como também se caracteriza por possuir seis graus de liberdade por nó sendo três translações e três rotações nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . As cargas podem ser aplicadas ortogonalmente e também paralelamente sobre este elemento.

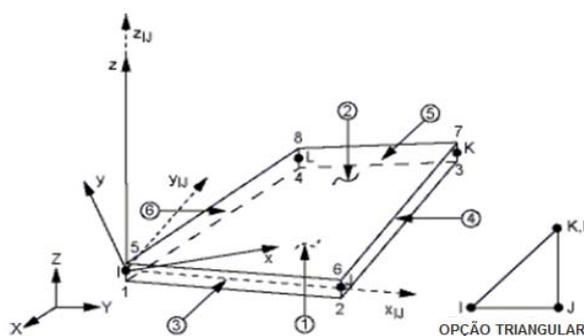


Figura 106 - Elemento SHELL63 (ANSYS, 2009)

O elemento COMBIN7 refere-se a um elemento de ligação 3-D que pode ser utilizado para ligar duas ou mais partes de um modelo em um nó coincidente. Este

elemento, representado pela Figura 107, apresenta uma capacidade de flexibilidade, atrito e amortecimento. Tal elemento possui uma importante característica de deformação, em que um sistema de coordenadas local está fixado e se move com o conjunto. O elemento pode ser utilizado na simulação de rótulas em sistemas estruturais.

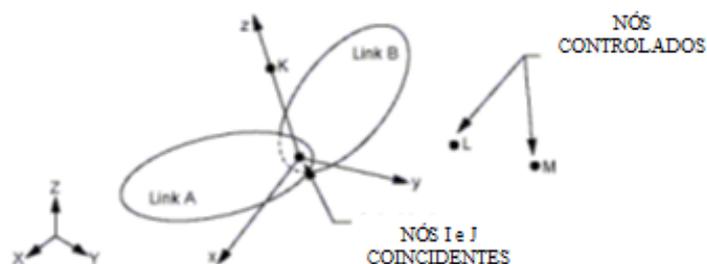


Figura 107 - Elemento COMBIN7 (ANSYS, 2009)

O elemento COMBIN39 possui capacidade de força-deflexão generalizada que pode ser usado em qualquer análise. Além disso, apresenta grande capacidade de torção longitudinal com até três graus de liberdade em cada nó, conforme a ilustração da Figura 108.

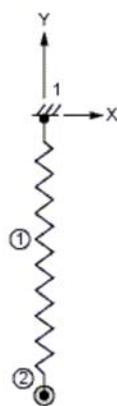


Figura 108 - Elemento COMBIN39 (ANSYS, 2009)

O COMBIN 40 é um elemento composto por massa, mola e amortecedor. Além disso, o elemento é definido por dois nós e possui apenas um grau de liberdade em cada nó, podendo ser uma translação, ou uma rotação ou ainda a pressão ou a temperatura nodal. A Figura 109 representa o elemento.

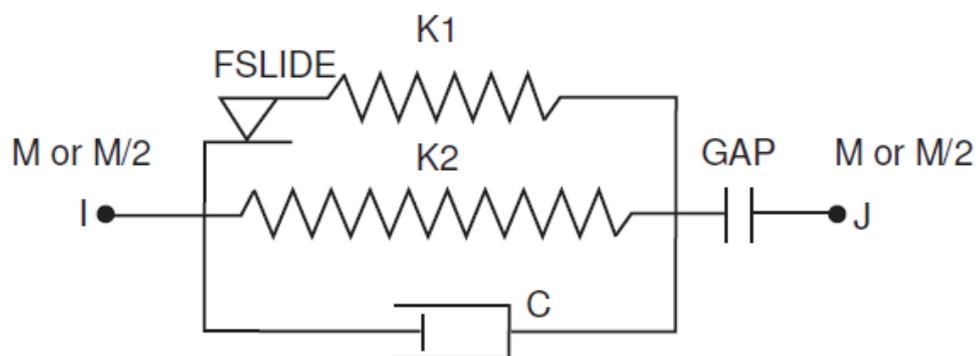


Figura 109 - Elemento COMBIN40 (ANSYS, 2009)

#### 6.4 Modelagem do amortecimento estrutural

O amortecimento é caracterizado pela dissipação da energia mecânica proveniente da vibração da estrutura. A definição deste amortecimento estrutural é uma tarefa com alta complexidade e dificuldade, pois não pode ser determinada através da geometria da estrutura, das dimensões dos elementos estruturais e do amortecimento dos materiais (alvenaria, acabamentos, divisórias e mobiliários), segundo Clough e Penzien (1993).

A maneira mais adequada de definição do amortecimento estrutural é utilizando a taxa de amortecimento modal em vez de obter os coeficientes da matriz de amortecimento, visto que a taxa de amortecimento modal ou contribuição pode ser determinada experimentalmente ou estimada com adequada precisão, de acordo com Clough e Penzien (1993). Entretanto, existem casos em que é necessária a determinação da matriz de amortecimento para a obtenção da resposta dinâmica. Nestes casos, a análise dinâmica transiente é realizada através do método de integração numérica de Newmark.

Quando não é necessário determinar a matriz de amortecimento, utiliza-se a matriz de amortecimento de Rayleigh, que considera a uma taxa de contribuição da matriz de rigidez ( $\beta$ ) e outra da matriz de massa ( $\alpha$ ), de acordo com a equação (37). De acordo com esta equação, considera-se  $M$  a matriz de massa e  $K$  a matriz de rigidez do sistema estrutural, segundo Clough e Penzien (1993) e Chopra (2007).

$$C = \alpha M + \beta K \quad (37)$$

A taxa de amortecimento para o  $i$ -ésimo modo é representada pela equação (38):

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2 \omega_{0i}} + \frac{\beta \omega_{0i}}{2} \quad (38)$$

Onde:

$\omega_{0i}$  representa a frequência natural circular em rad/s.

$\alpha$  representa a matriz de massa

$\beta$  representa a matriz rigidez

Isolando os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da equação (37), para as duas frequências mais importantes adotadas como referência ( $\omega_{01}$  e  $\omega_{02}$ ), são obtidas as equações (39) e (40), apresentadas abaixo.

$$\alpha = 2 \xi_1 \omega_{01} - \beta \omega_{01} \omega_{01} \quad (39)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2 \omega_{02} - \xi_1 \omega_{01})}{\omega_{02} \omega_{02} - \omega_{01} \omega_{01}} \quad (40)$$

As deduções matemáticas para o amortecimento de Rayleigh são encontradas em Clough e Penzien (1993).

Os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  são obtidos a partir do conhecimento da frequência natural  $\omega_{01}$  ou frequência fundamental da estrutura, e  $\omega_{02}$  como a segunda frequência mais importante no carregamento. Deste modo, através da análise modal realizada no piso misto investigado, determinou-se que os valores de  $\omega_{01}$  e  $\omega_{02}$  foram 6,06 Hz e 6,36 Hz, respectivamente, além de consideramos  $\xi_1$  e  $\xi_2$  iguais a 1%. A partir desses valores, obtém-se a taxa de amortecimento estrutural adequada ao piso.

Conforme 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 em estruturas de concreto é também significativa. A Tabela B.2 da ISO 10137 (2007, p. 29), apresenta os valores típicos da taxa de amortecimento para o modo fundamental de pisos mistos e de concreto armado. Deste modo, a taxa de amortecimento estrutural escolhida foi de 1% para o piso investigado neste trabalho.

A utilização de uma taxa de amortecimento da ordem de 1% é citada no guia SCI (2009) para vários sistemas estruturais. Essa taxa refere-se ao sistema estrutural em “osso”, onde poucos elementos não estruturais contribuem para o amortecimento, podendo ser útil na avaliação das vibrações pelo engenheiro na análise do conforto humano da estrutura antes da construção estar finalizada.

## 6.5 Considerações finais

A partir do emprego do programa ANSYS (2009), o modelo numérico-computacional do piso misto estudado foi desenvolvido. Os elementos finitos empregados foram o SHELL63 para representar a laje de concreto, enquanto o BEAM44 simulou as vigas e pilares. Além disso, as ligações viga-viga e viga-coluna foram representadas pelo COMBIN7 e COMBIN39, respectivamente. Por fim, o elemento COMBIN40 simulou 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 sete e oito, respectivamente.

## 7 FREQUENCIAS E MODOS DE VIBRAÇÃO

### 7.1 Considerações iniciais

O comportamento dinâmico do piso misto é avaliado inicialmente através das frequências naturais e seus respectivos modos de vibração, com base no emprego do programa computacional ANSYS (2009). 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.

Neste trabalho de pesquisa, determinam-se as frequências e modos de vibração do piso misto vazio, e posteriormente ocupado pelas pessoas representadas pela modelagem biodinâmica. Em seguida, a influência da ocupação das pessoas sobre o piso misto é analisada, sob o ponto de vista das frequências naturais e amortecimento estrutural.

### 7.2 Análise das frequências naturais do piso misto vazio

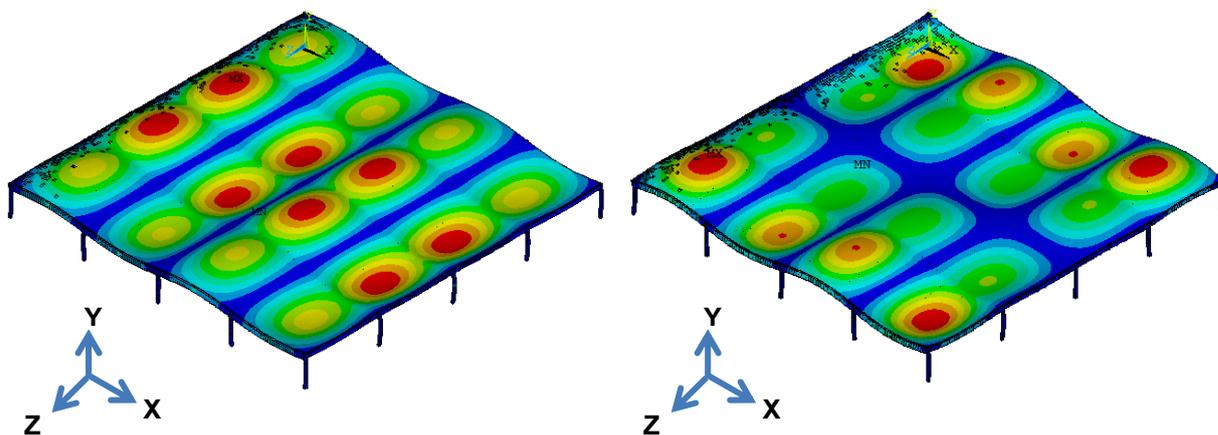
As seis primeiras frequências naturais e seus respectivos valores de massa modal, rigidez modal e amortecimento modal, associado a cada modo de vibração, estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Características modais do piso misto investigado (aço-concreto)

Modo de vibração	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)	Frequência (Hz)	Fenômeno físico
$f_{01}$	118843	$1,72 \times 10^8$	$1,36 \times 10^8$	6,06	Flexão da laje em x
$f_{02}$	90966	$1,45 \times 10^8$	$1,09 \times 10^8$	6,36	Flexão da laje em x
$f_{03}$	72828	$1,19 \times 10^8$	$0,88 \times 10^8$	6,43	Flexão da laje em x
$f_{04}$	52442	$0,92 \times 10^8$	$0,66 \times 10^8$	6,65	Flexão da laje em x
$f_{05}$	65495	$1,24 \times 10^8$	$0,85 \times 10^8$	6,91	Flexão da laje em z
$f_{06}$	60044	$1,18 \times 10^8$	$0,80 \times 10^8$	7,05	Flexão da laje em z

Segundo Ohlsson (1982), o sistema estrutural investigado neste trabalho é classificado como um piso pesado, uma vez que a massa modal relacionada ao modo de vibração de interesse ( $f_{01}=6,06\text{Hz}$ ) apresenta massa superior a 1.000kg.

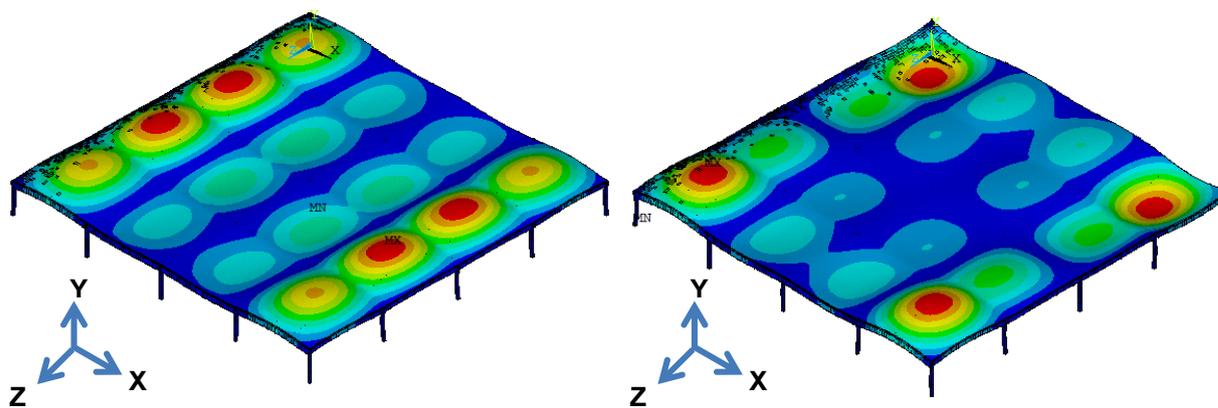
As Figuras 110 a 112 apresentam os seis primeiros modos de vibração do modelo estrutural associado as suas respectivas frequências naturais.



a) 1° Modo de vibração ( $f_{01}=6,06\text{Hz}$ )

b) 2° Modo de vibração ( $f_{02}=6,36\text{Hz}$ )

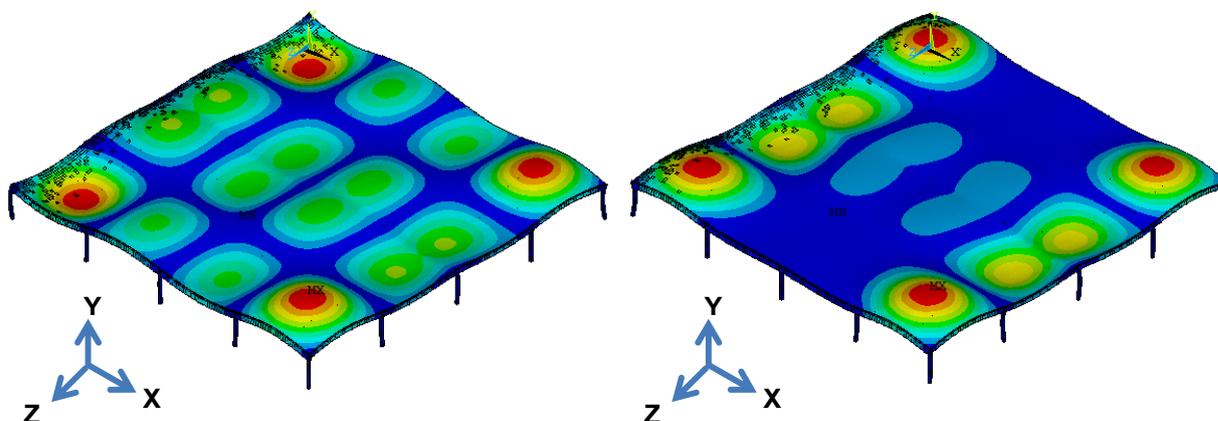
Figura 110 - 1° e 2° modo de vibração do piso misto investigado



a) 3° Modo de vibração ( $f_{03}=6,43\text{Hz}$ )

b) 4° Modo de vibração ( $f_{04}=6,65\text{Hz}$ )

Figura 111 - 3° e 4° modo de vibração do piso misto investigado



a) 5° Modo de vibração ( $f_{05}=6,91\text{Hz}$ )

b) 6° Modo de vibração ( $f_{06}=7,05\text{Hz}$ )

Figura 112 - 5° e 6° modo de vibração do piso misto investigado

A partir das frequências naturais do piso misto apresentados pela Tabela 28, observou-se que a frequência fundamental da estrutura é igual a 6,06 Hz, correspondente ao primeiro modo de flexão da laje de concreto. Além disso, é possível notar que as frequências naturais do piso misto encontram-se entre 6,06 a 7,05Hz, de tal modo que se aproximam da faixa da frequência de excitação correspondente ao terceiro harmônico de atividades aeróbicas, variando de 5,66 a 8,57Hz (FAISCA, 2003) e de 4,5 a 8,4Hz (ELLIS; JI, 2004). Conseqüentemente, o piso pode entrar em ressonância em virtude da aproximação entre a frequência de excitação do carregamento dinâmico e frequências naturais do piso misto.

Segundo as normas de critérios de projeto destinadas a atividades rítmicas praticadas sobre pisos apresentadas na Tabela 29, observa-se que a frequência fundamental do piso ( $f_{01}=6,06$  Hz) está abaixo do valor mínimo recomendado. Esta situação remete a uma grande probabilidade de problemas relacionados a vibrações excessivas.

Tabela 29 - Frequências naturais recomendadas para atividade aeróbica

Norma / Critérios de projeto	Atividade praticada	Frequência natural mínima (Hz)
NBR 8800	Ginástica aeróbica	8
NBR 6118	Ginásio de esportes	9,6
Guia AISC	Ginástica aeróbica para pisos leves	9,2

### 7.3 Análise das frequências naturais do piso ocupado

Conforme estudos desenvolvidos por diversos autores [BROWNJOHN, 1999; ELLIS; JI, 1997; FALATI, 1999; SALYARDS; FIRMAN III, 2011; SALYARDS; NOSS, 2014; SHAHABPOOR et al.,2017], observa-se que a presença do ser humano modifica os parâmetros dinâmicos do sistema estrutural (massa, amortecimento e rigidez) e as frequências naturais. Neste sentido, foram realizadas análises modais considerando a presença do ser humano, através da utilização do modelo biodinâmico proposto pelo capítulo 4.

Os modelos biodinâmicos representativos dos indivíduos foram posicionados sobre os painéis centrais do piso misto (aço-concreto) investigado, de modo a mobilizar as amplitudes modais máximas apresentadas no 1º modo de vibração do piso misto (Figura 110a). Cabe ressaltar que 15 (quinze) simulações numéricas foram investigadas, considerando-se a variação do número de pessoas (16 a 128 indivíduos), conforme a ilustração das Figuras 116 a 130, e tendo em mente a avaliação do efeito do aumento de pessoas passivas [paradas e em pé] sobre as características dinâmicas do modelo estrutural. Em seguida, a Figura 113 apresenta a área ocupada pelas pessoas sobre a estrutura [modelos biodinâmicos parados e em pé]. A Tabela 30 apresenta os valores das características dinâmicas do piso misto, no que diz respeito à avaliação da frequência fundamental da estrutura ocupada por pessoas paradas e em pé sobre a região delimitada pela Figura 113.

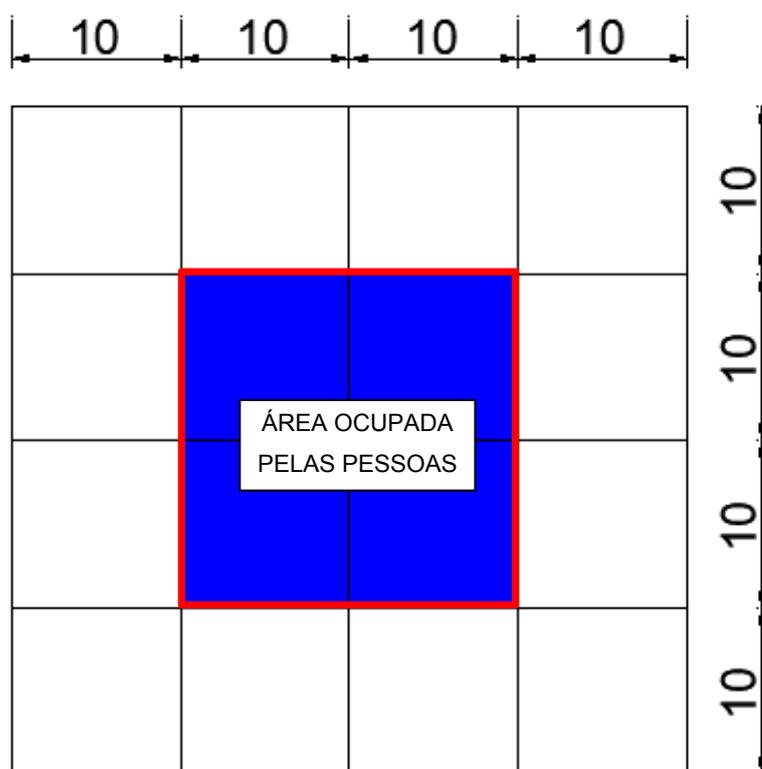


Figura 113 - Posicionamento das pessoas sobre piso misto investigado

Tabela 30 - Características modais do modelo estrutural ocupada: Frequência fundamental

Pessoas	Frequência (Hz)	Taxa de amortecimento $\xi$ (%)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)
0	6,060	1,2	$1,19 \times 10^5$	$1,73 \times 10^8$	$1,09 \times 10^7$
16	6,048	2,1	$1,17 \times 10^5$	$1,69 \times 10^8$	$1,86 \times 10^7$
24	6,043	3,2	$1,15 \times 10^5$	$1,66 \times 10^8$	$2,79 \times 10^7$
32	6,034	3,5	$1,11 \times 10^5$	$1,60 \times 10^8$	$2,95 \times 10^7$
40	6,031	4,4	$1,11 \times 10^5$	$1,60 \times 10^8$	$3,70 \times 10^7$
48	6,025	5,1	$1,09 \times 10^5$	$1,56 \times 10^8$	$4,19 \times 10^7$
56	6,010	6,2	$1,03 \times 10^5$	$1,47 \times 10^8$	$4,83 \times 10^7$
64	6,002	6,8	$1,03 \times 10^5$	$1,46 \times 10^8$	$5,26 \times 10^7$
72	6,001	7,3	$1,02 \times 10^5$	$1,46 \times 10^8$	$5,64 \times 10^7$
80	5,997	8,5	$1,02 \times 10^5$	$1,45 \times 10^8$	$6,56 \times 10^7$
88	5,983	9,2	$0,98 \times 10^5$	$1,38 \times 10^8$	$6,77 \times 10^7$
96	5,978	10,4	$0,97 \times 10^5$	$1,37 \times 10^8$	$7,56 \times 10^7$
108	5,974	10,9	$0,97 \times 10^5$	$1,36 \times 10^8$	$7,90 \times 10^7$
112	5,954	11,6	$0,90 \times 10^5$	$1,25 \times 10^8$	$7,77 \times 10^7$
120	5,943	12,4	$0,89 \times 10^5$	$1,24 \times 10^8$	$8,24 \times 10^7$
128	5,933	13,2	$0,89 \times 10^5$	$1,23 \times 10^8$	$8,71 \times 10^7$

Com base nos resultados fornecidos pela Tabela 30, é possível verificar a modificação das características dinâmicas do piso misto (massa, rigidez e amortecimento), devido à ocupação do piso em estudo. Neste sentido, verificou-se uma redução pouco expressiva da frequência natural, da ordem de 3%, de modo que a frequência natural diminui conforme aumentava-se a ocupação do piso misto (presença das pessoas), tendo em mente que a relação  $M_p/M_e$  ( $M_p$ : massa das pessoas;  $M_e$ : massa da estrutura), também é pequena, igual a 0,0194 (1,94%), para a situação limite em que 128 pessoas encontram-se sobre a laje de concreto.

Por outro lado, o valor da taxa de amortecimento estrutural do piso misto apresentou um aumento bem significativo, variando de 1,2% (piso descarregado) para 13,2% (piso carregado: 128 pessoas), constatando a importância do efeito do amortecimento das pessoas sobre as características dinâmicas do piso misto (aço-concreto).

Em relação às pessoas presentes sobre o piso misto, é importante destacar que o valor máximo da relação  $M_p/M_e$  ( $M_p$ : massa das pessoas;  $M_e$ : massa do piso misto) foi igual a 1,94%, referente a situação com 128 pessoas, ou seja, o efeito da massa das pessoas é muito pequeno sobre a massa do piso misto, entretanto, alterou significativamente a taxa de amortecimento estrutural.

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 sobre estrutura era insignificante.

A partir dos resultados obtidos, ressalta-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 (ELLIS; JI, 1997; BROWNJOHN, 1999; SIM, 2006; SALYARDS; NOSS, 2014; CAPPELLINI, 2015; HE et al., 2017; SHAHABPOOR et al., 2017).

#### 7.4 Influência da ocupação do piso misto sobre as frequências naturais

Os valores das frequências naturais do piso misto, obtidas pela análise modal realizada pelo programa ANSYS (2009) e apresentadas na seção 7.3, foram reduzidos gradativamente em função do aumento de pessoas em pé e paradas, representadas por sistemas biodinâmicos.

A Figura 114 apresenta a influência da relação  $M_p/M_e$  ( $M_p$ : massa das pessoas;  $M_e$ : massa do piso misto), sobre a frequência natural relacionada ao primeiro modo de vibração, e além disso, descreve a equação relacionando frequência natural e relação  $M_p/M_e$ . Em relação ao número de pessoas presentes

sobre a área destacada na Figura 113, distribuídas conforme as 15 situações (Figuras 116 a 130), o número máximo de 128 pessoas ( $M_p/M_e(\%)$  igual a 1,94%) baseia-se numa ocupação em que as pessoas encontram-se com espaço razoável entre as mesmas.

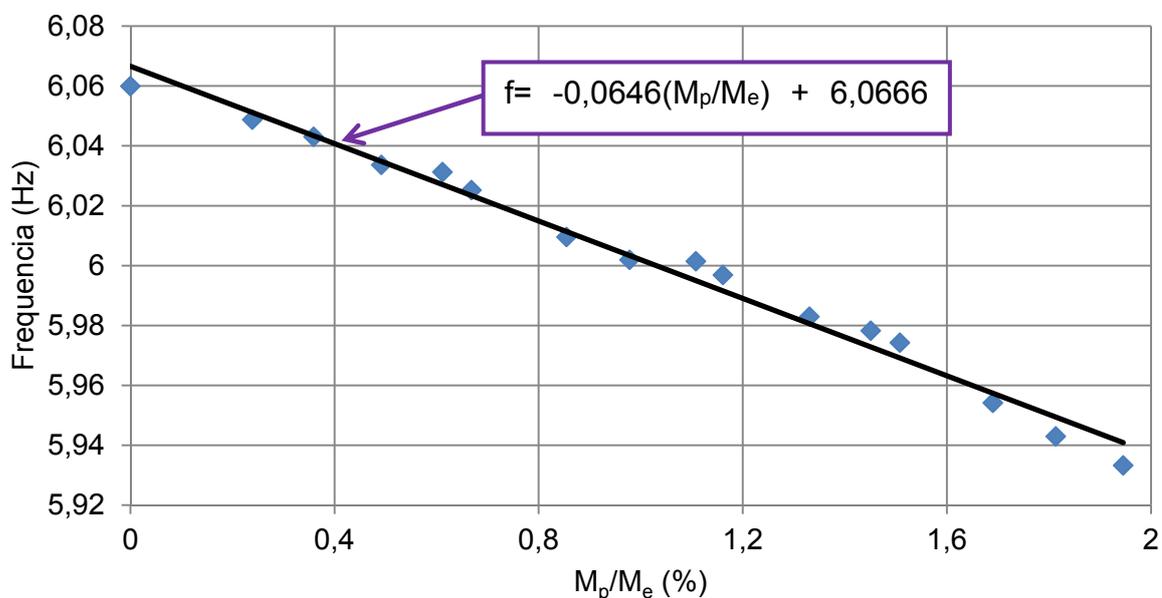


Figura 114 - Variação da Frequência natural devido à presença das pessoas

Com base na Figura 114, é possível verificar que o valor da frequência natural diminui à medida que aumenta a ocupação do piso misto. É importante ressaltar que, conforme citado na seção 7.3, essa variação numérica foi pouco expressiva e inferior a 3%.

Diversos trabalhos de pesquisa, apresentados na seção 1.4, observaram a redução nos valores da frequência natural devido à ocupação das pessoas paradas e em pé sobre a estrutura, de modo a corroborar os resultados obtidos neste trabalho. Por exemplo, Shahabpoor et al. (2017) verificaram, através da análise modal experimental, a redução da frequência natural de 4,44 Hz (estrutura vazia) para 4,175 Hz quando a estrutura encontrava-se ocupada por 10 pessoas. Além disso, Salyards e Noss (2014) realizaram testes experimentais, de modo que verificaram que pessoas em pé com os joelhos retos diminuiriam a frequência natural da estrutura. Por fim, He et al. (2017) também constataram, a partir da investigação da interação ser humano-estrutura em uma passarela com frequência fundamental de 2,83Hz, uma diferença percentual na frequência natural da estrutura na ordem de 15%, quando a estrutura estava ocupada por indivíduos em pé com joelhos retos.

## 7.5 Influência da ocupação do piso misto no amortecimento estrutural

A partir da realização de análises transientes no programa ANSYS (2009), caracterizada pela aplicação de uma força concentrada durante 1 segundo sobre o centro da laje de concreto, foram gerados os sinais de deslocamento no domínio do tempo para as 15 situações de carregamento. Cabe ressaltar que durante as análises, considerou-se a ocupação da estrutura por modelos biodinâmicos representando as pessoas paradas e em pé.

Posteriormente, o amortecimento estrutural foi determinado por meio do decremento logarítmico para cada ocupação do piso misto, descrito pelas equações (41) e (42), respectivamente.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} \quad (41)$$

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (42)$$

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

A Figura 115 apresenta a influência da relação  $M_p/M_e$  ( $M_p$ : massa das pessoas;  $M_e$ : massa do piso misto), sobre a taxa de amortecimento estrutural relacionado ao primeiro modo de vibração, e além disso, descreve a equação relacionando a taxa de amortecimento e relação  $M_p/M_e$ . A referida relação possibilitou a avaliação do comportamento do amortecimento estrutural na resposta dinâmica do piso misto.

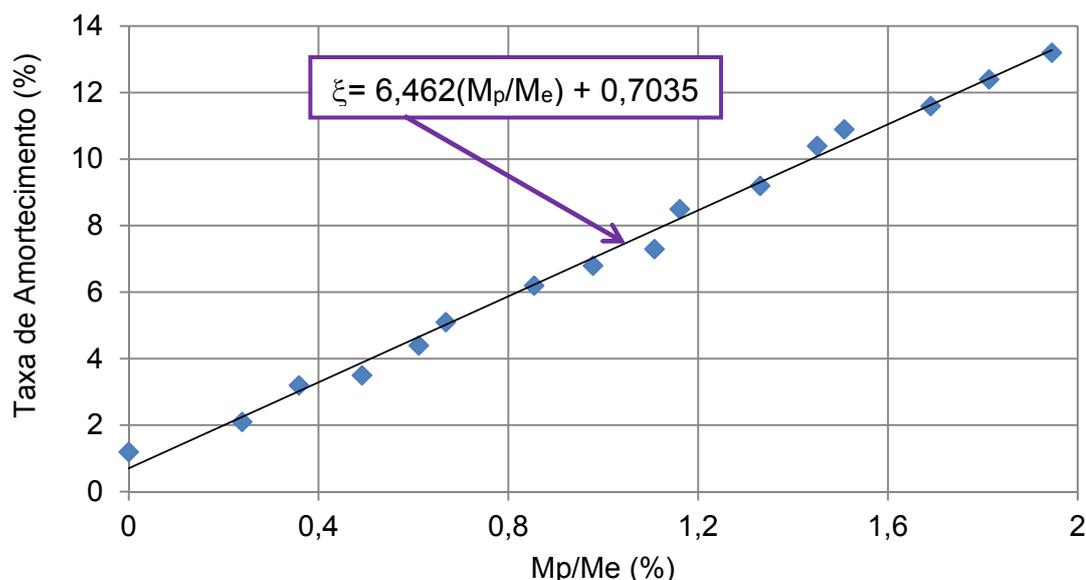


Figura 115 - Variação da taxa de amortecimento devido à presença das pessoas

Verifica-se que o amortecimento estrutural aumenta significativamente à medida que se aumenta a ocupação da estrutura, constatando a importância da modelagem biodinâmica para a representação dos seres humanos na avaliação da resposta dinâmica do piso misto. O valor do amortecimento modal variou de 1,2% (estrutura vazia) para 13,2% (presença humana).

Na literatura técnica, por exemplo, Shahabpoor et al. (2017), investigaram os efeitos causados pela ocupação humana sobre as propriedades modais do sistema estrutural, constatando o aumento da taxa de amortecimento de 0,60% (estrutura vazia) para 2,60%, quando 10 pessoas estavam ocupando a estrutura. Além disso, He et al. (2017) concluíram que a taxa de amortecimento da estrutura aumentou drasticamente de 0,42% para 1,44% para as pessoas paradas com os joelhos retos. Neste contexto, trabalhos desenvolvidos por Brownjohn (1999), Falati (1999), Salyards e Noss (2014) e Zivanovic et al. (2009) corroboram a mesma conclusão.

## 7.6 Considerações finais

Conclui-se neste capítulo que o piso misto estudado apresentou sua frequência fundamental abaixo dos valores recomendados por guias e normas de

projeto. Posteriormente, realizou-se uma análise modal considerando a presença dos seres humanos em pé e parados, através dos sistemas biodinâmicos caracterizados por sua massa, amortecimento e rigidez. Por fim, a influência das pessoas sobre as propriedades dinâmicas do piso misto foram investigadas, de tal modo que verificou-se uma ligeira redução da frequência natural da estrutura e aumento considerável da taxa de amortecimento estrutural conforme se aumenta a taxa de ocupação do piso misto.

## 8 ANÁLISE TRANSIENTE E AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

### 8.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através da análise dinâmica (vibração forçada) com base no emprego do modelo estrutural do piso misto (aço-concreto). As análises procuraram avaliar o comportamento dinâmico do sistema estrutural, quando submetidas a ações humanas rítmicas praticadas por atividades aeróbicas (jump), no que tange ao desconforto humano oriundo das vibrações.

As atividades aeróbicas foram realizadas sob a frequência de excitação de 2,20 Hz, sendo simuladas por meio do programa computacional ANSYS (2009) no tempo total de 20 segundos, com intervalo de tempo de 0,002 s. Deste modo, as respostas dinâmicas da estrutura foram determinadas ao longo do tempo, em termos de deslocamentos translacionais verticais e das acelerações, provenientes da aplicação dos sistemas biodinâmicos apresentados no capítulo 4. É importante destacar que os sistemas biodinâmicos considera o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL).

Posteriormente, foi realizada uma extensa análise paramétrica, objetivando avaliar o conforto humano do piso investigado. Para tal, os resultados obtidos, em termos das acelerações máximas (acelerações de pico), aceleração RMS e valores de dose de vibração (VDV) foram comparados e confrontados com os valores limites sob o ponto de vista de conforto humano.

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 Definição das situações de carregamento (sistemas biodinâmicos)

As situações de carregamento foram definidas de modo a investigar a influência da variação do número de pessoas sobre a resposta estrutural. Deste modo, considerou-se 15 (quinze) situações de carregamento variando o número de pessoas entre 16 a 128 pessoas, conforme a descrição apresentada na Tabela 31. As Figuras 116 a 130 ilustram cada situação de carregamento estudada.

O Apêndice C apresenta os valores de massa, rigidez e amortecimento das pessoas consideradas na modelagem dos sistemas biodinâmicos para cada uma das situações de carregamento. Nesse sentido, foi necessário replicar a quantidade de pessoas para alcançar o número total de pessoas para as situações de carregamento SC-12 a SC-15, visto que ultrapassam o número de 100 pessoas sobre o sistema estrutural. Por exemplo, a situação de carregamento SC-12 (108 pessoas), é possível verificar a necessidade de repetir 8 pessoas presentes na Tabela 55 para completar o número total de 108 pessoas.

Tabela 31 - Situações de carregamento investigadas

Situações	Quantidade de pessoas
SC-1	16
SC-2	24
SC-3	32
SC-4	40
SC-5	48
SC-6	56
SC-7	64
SC-8	72
SC-9	80
SC-10	88
SC-11	96
SC-12	108
SC-13	112
SC-14	120
SC-15	128

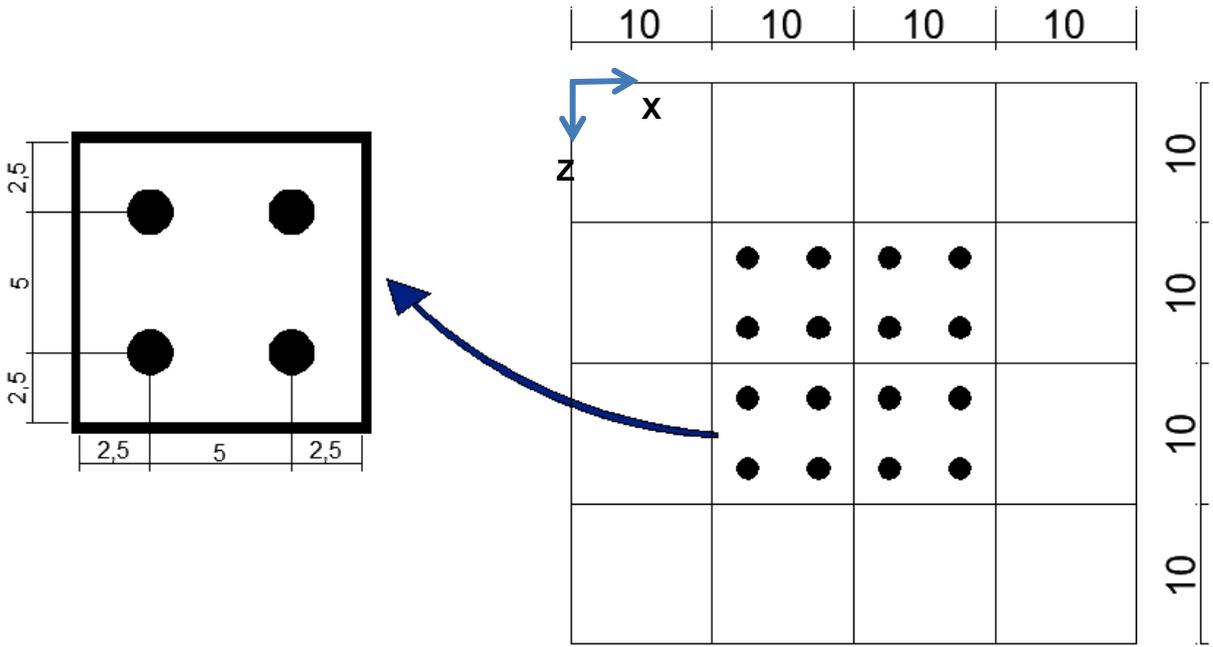


Figura 116 - Situação de carregamento SC-1

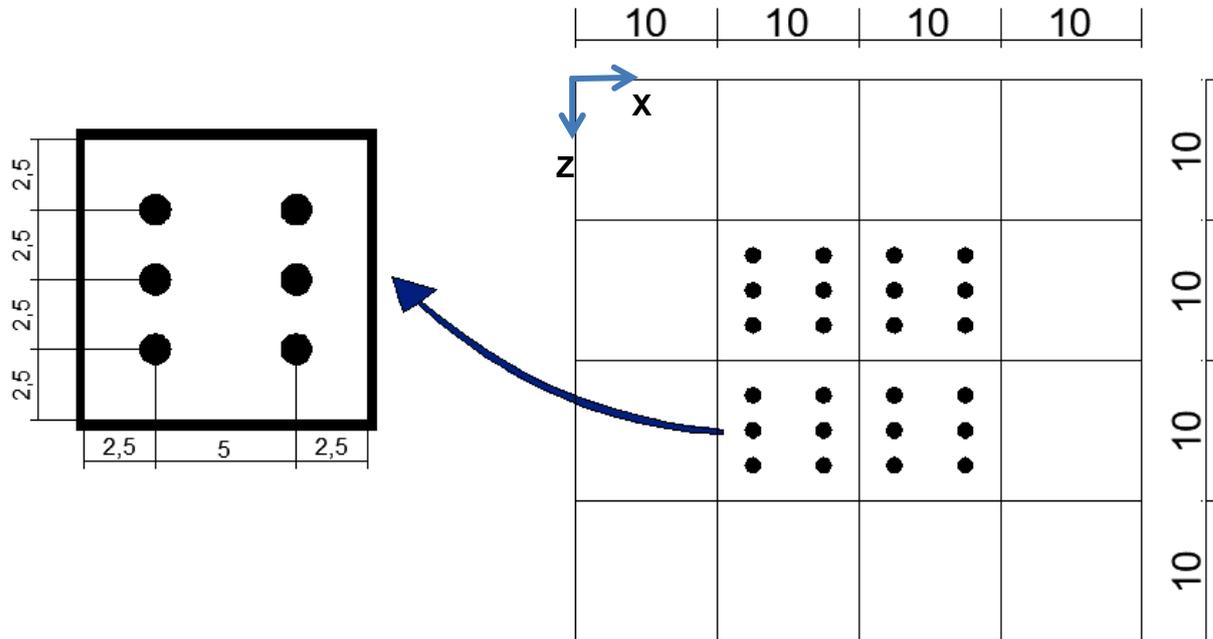


Figura 117 - Situação de carregamento SC-2

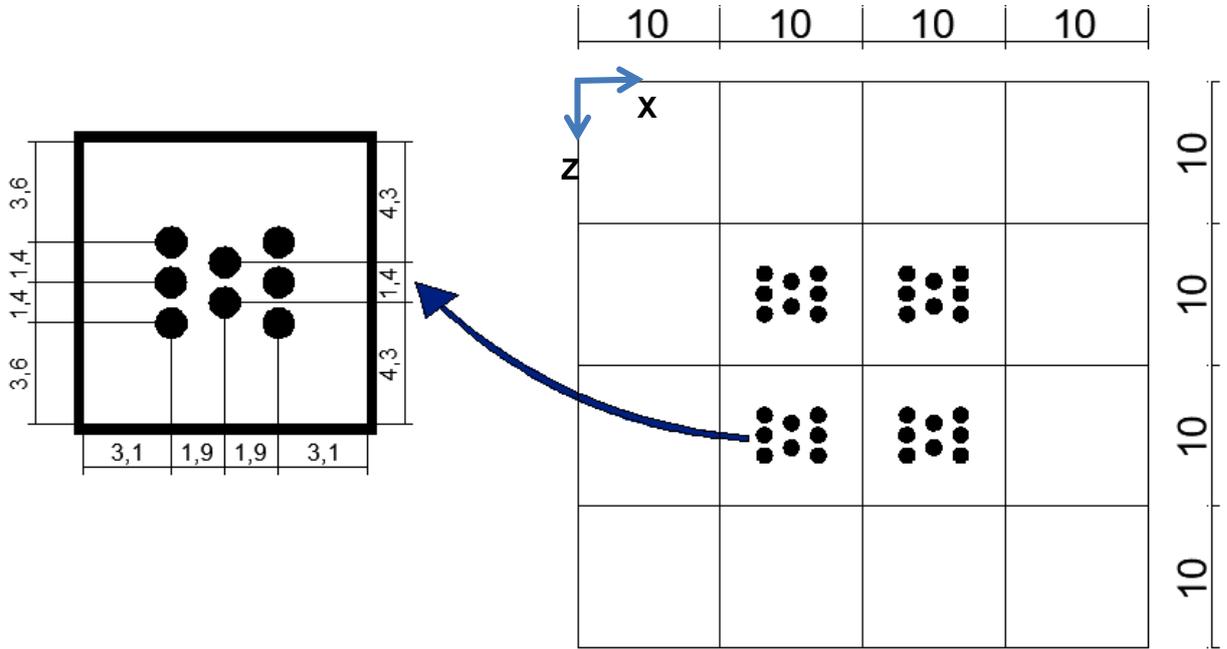


Figura 118 - Situação de carregamento SC-3

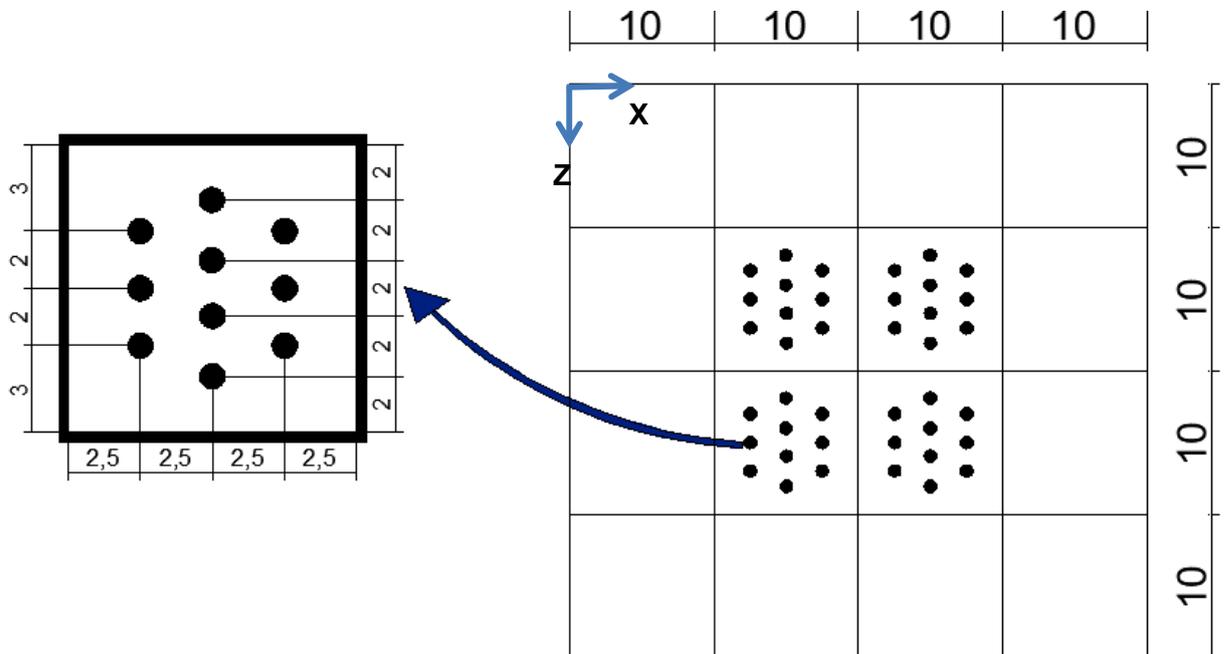


Figura 119 - Situação de carregamento SC-4

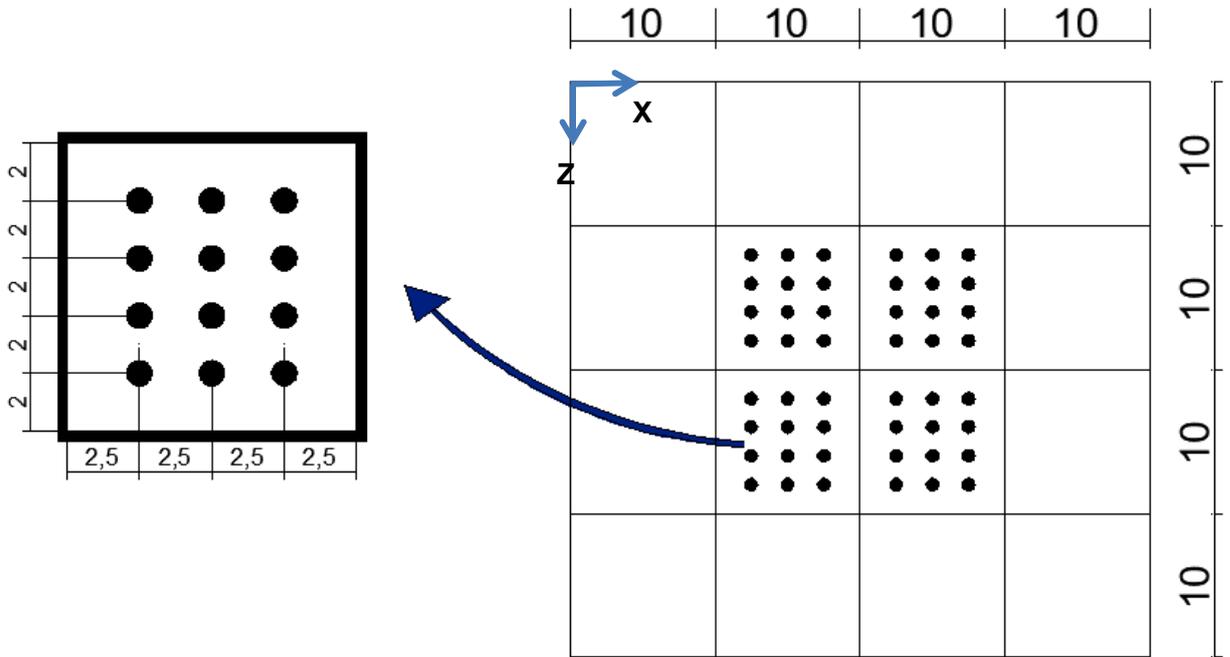


Figura 120 - Situação de carregamento SC-5

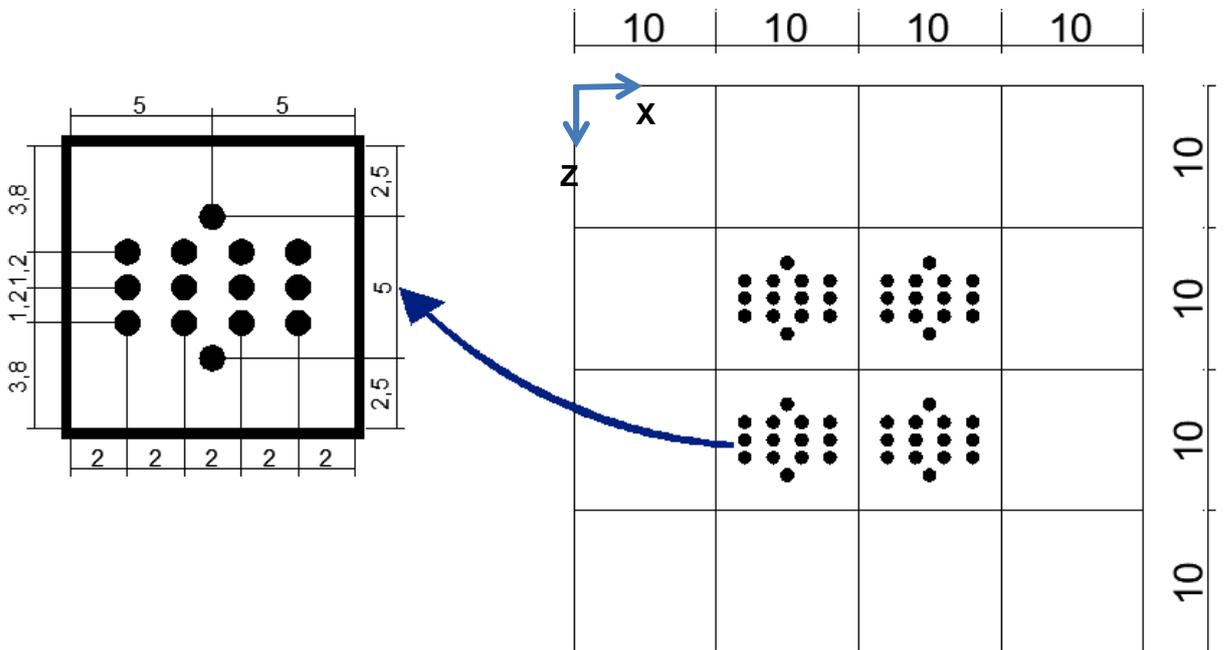


Figura 121 - Situação de carregamento SC-6

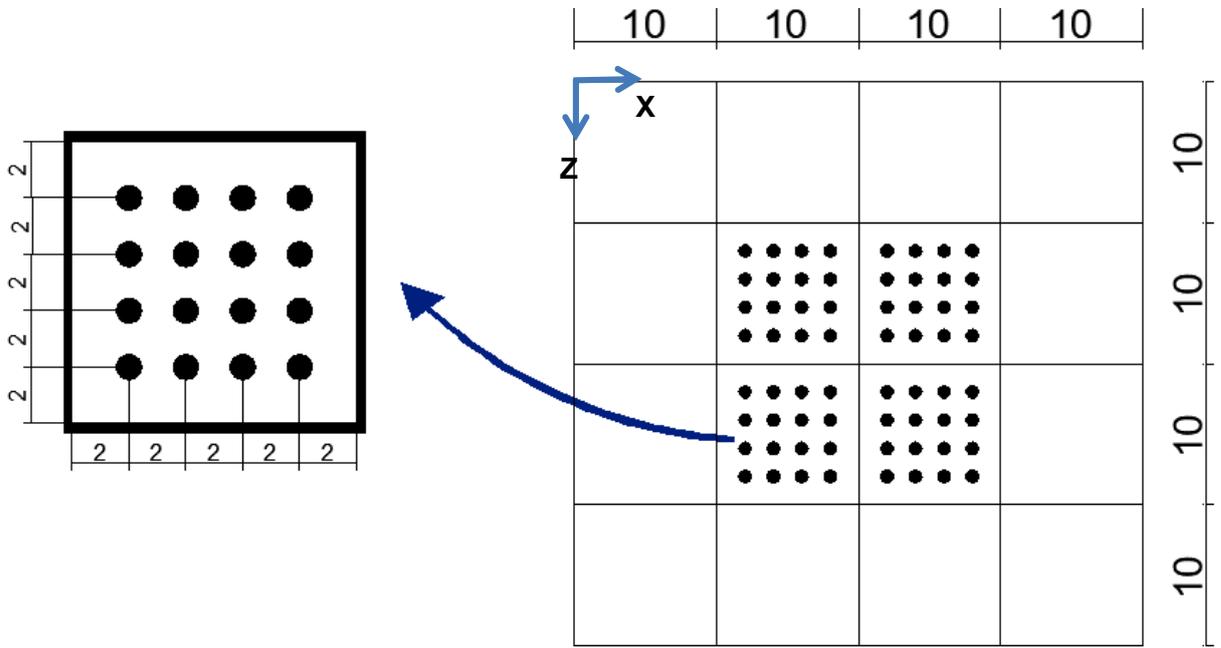


Figura 122 - Situação de carregamento SC-7

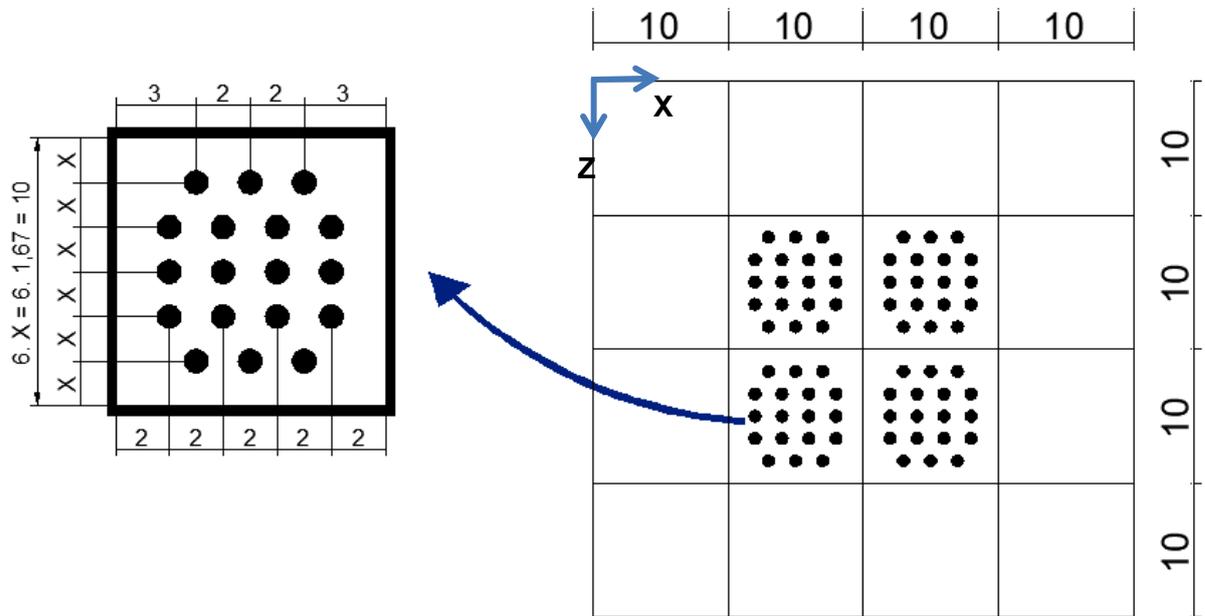


Figura 123 - Situação de carregamento SC-8

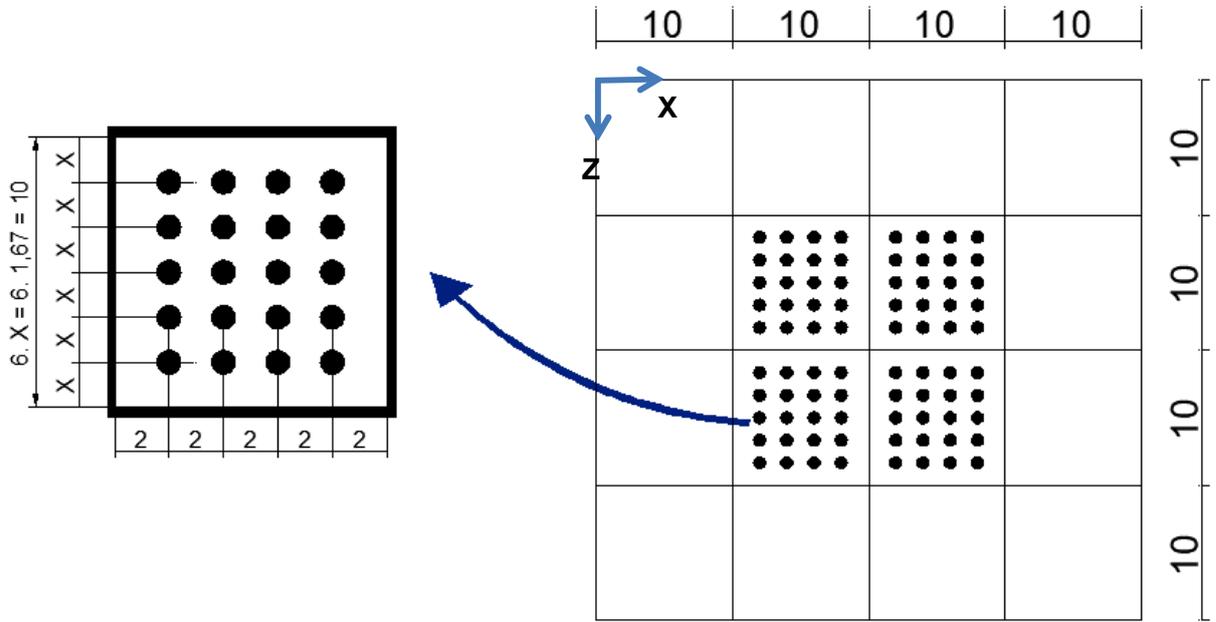


Figura 124 - Situação de carregamento SC-9

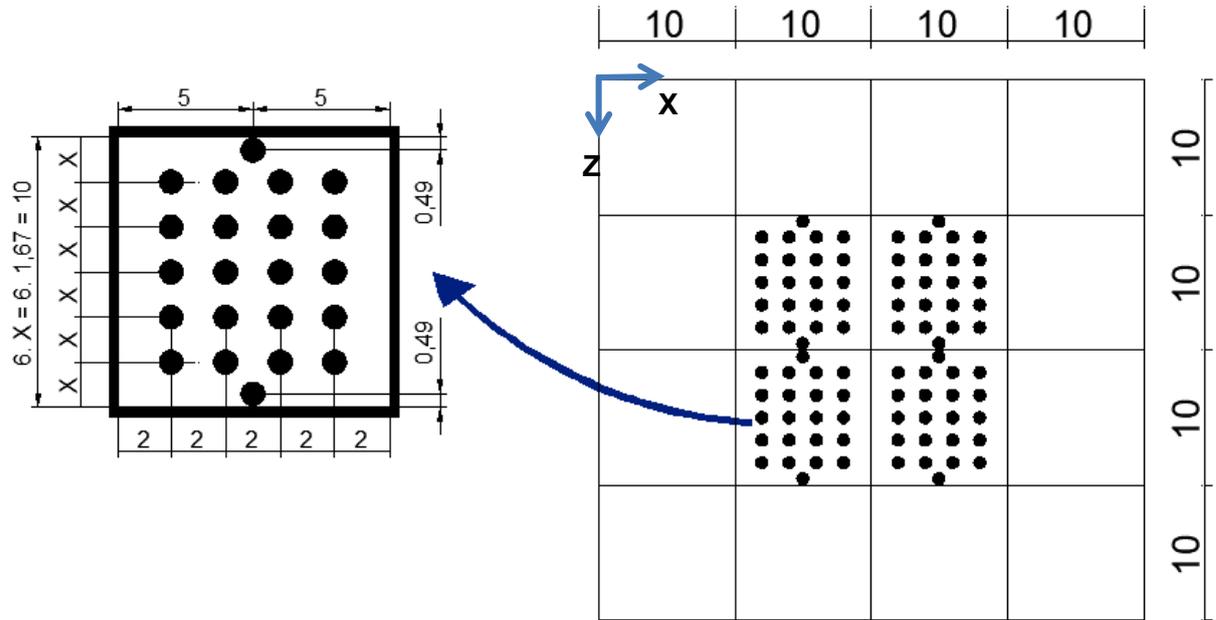


Figura 125 - Situação de carregamento SC-10

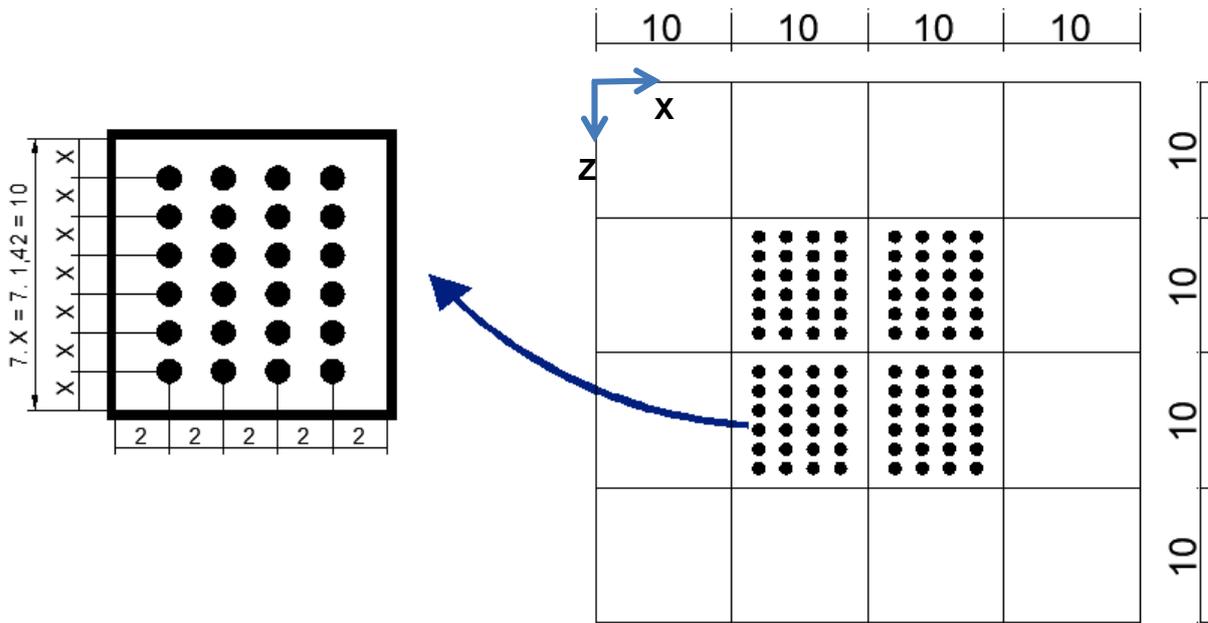


Figura 126 - Situação de carregamento SC-11

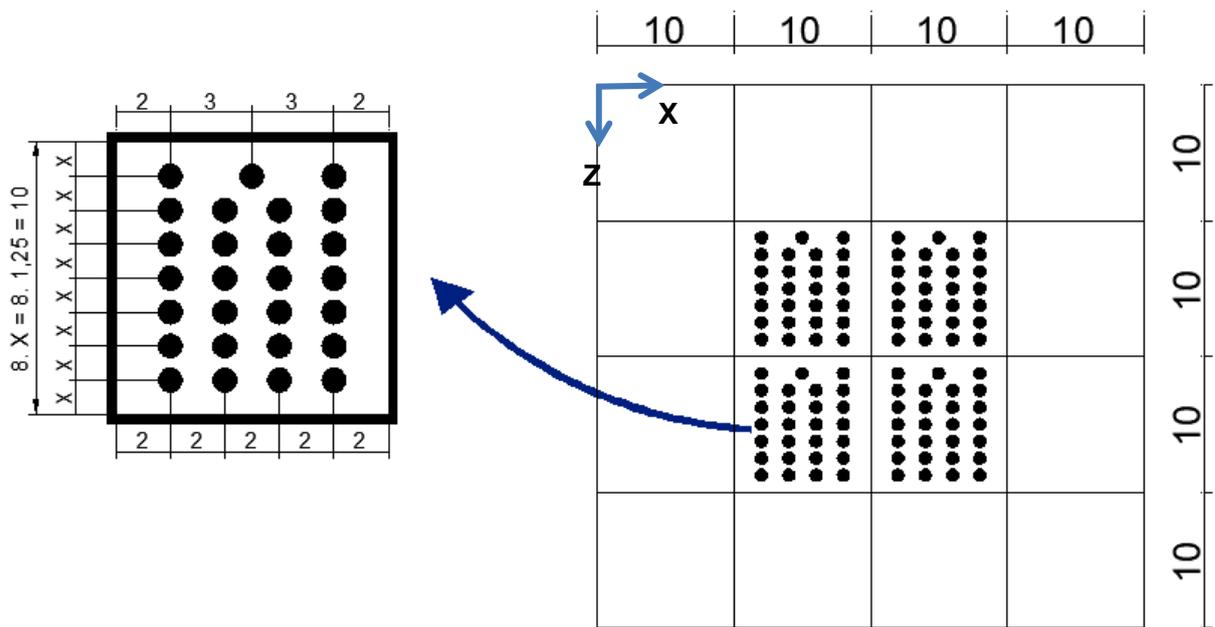


Figura 127 - Situação de carregamento SC-12

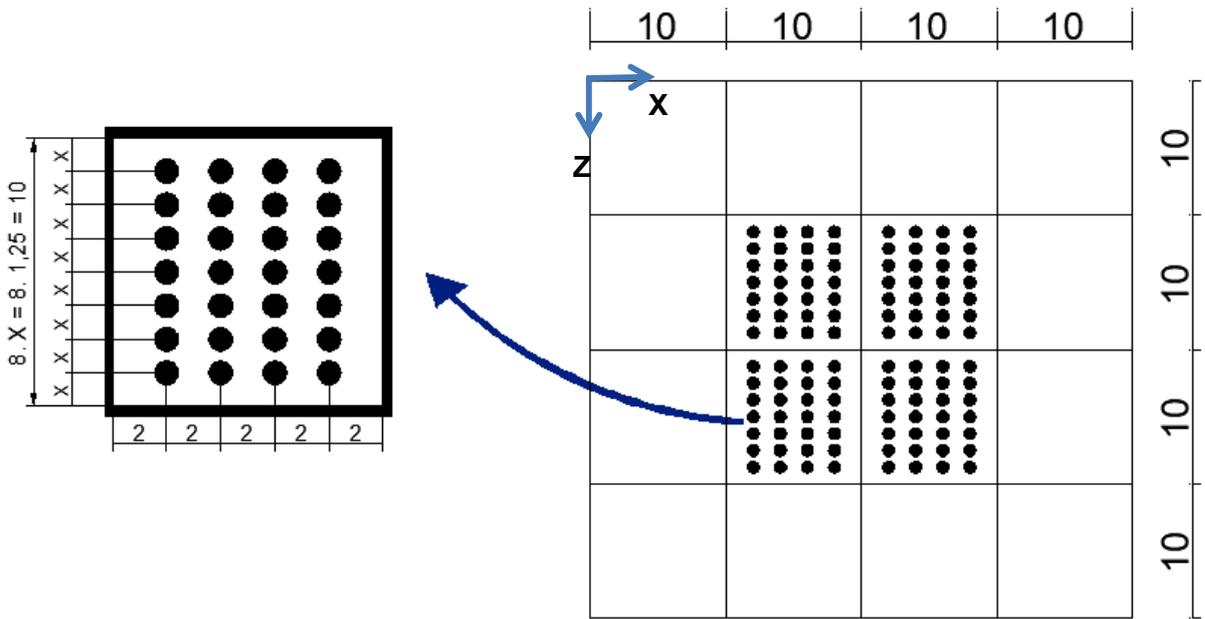


Figura 128 - Situação de carregamento SC-13

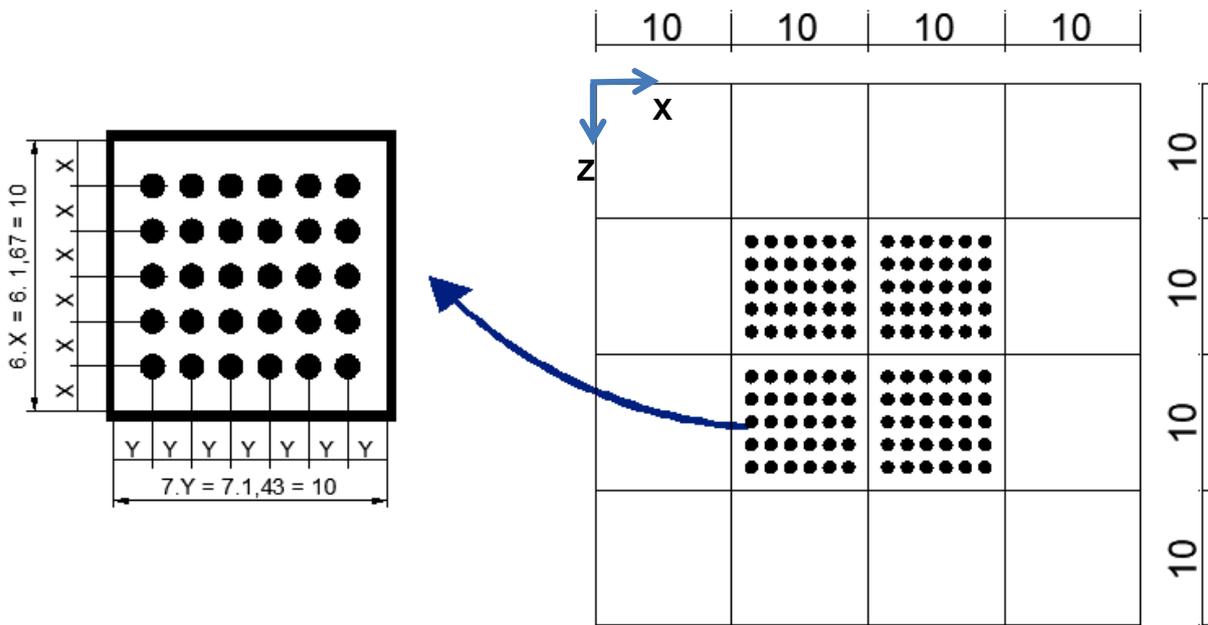


Figura 129 - Situação de carregamento SC-14

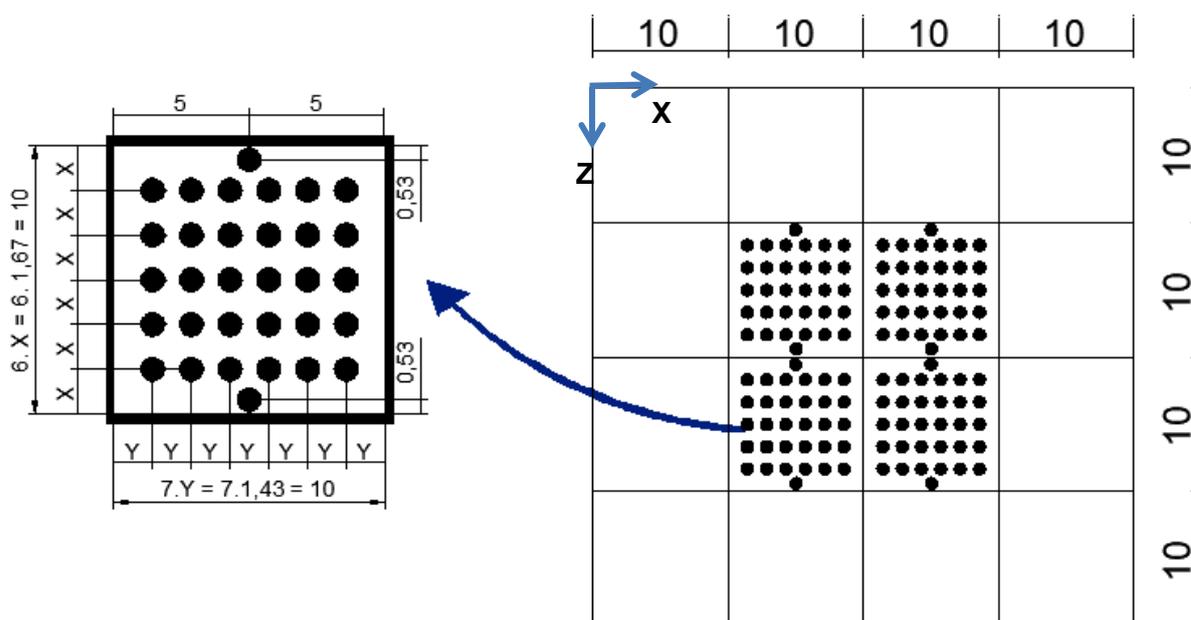


Figura 130 - Situação de carregamento SC-15

### 8.3 Seções estruturais utilizadas para obtenção das respostas dinâmicas

As respostas dinâmicas do piso misto (aço-concreto) foram determinadas nos pontos com as maiores amplitudes modais identificadas no 1º modo de vibração, associado à frequência fundamental da estrutura ( $f_{01}=6,60$  Hz). Deste modo, 8 (oito) pontos de leitura foram definidos para a obtenção da resposta dinâmica, descritos na Tabela 32. A Figura 131 ilustra o posicionamento dos pontos sobre o piso misto.

Tabela 32- Posicionamento dos pontos de leitura

Pontos de leitura	Localização
1	Seção central do 5º painel
2	Seção central do 6º painel
3	Seção central do 7º painel
4	Seção central do 8º painel
5	Seção central do 9º painel
6	Seção central do 10º painel
7	Seção central do 11º painel
8	Seção central do 12º painel

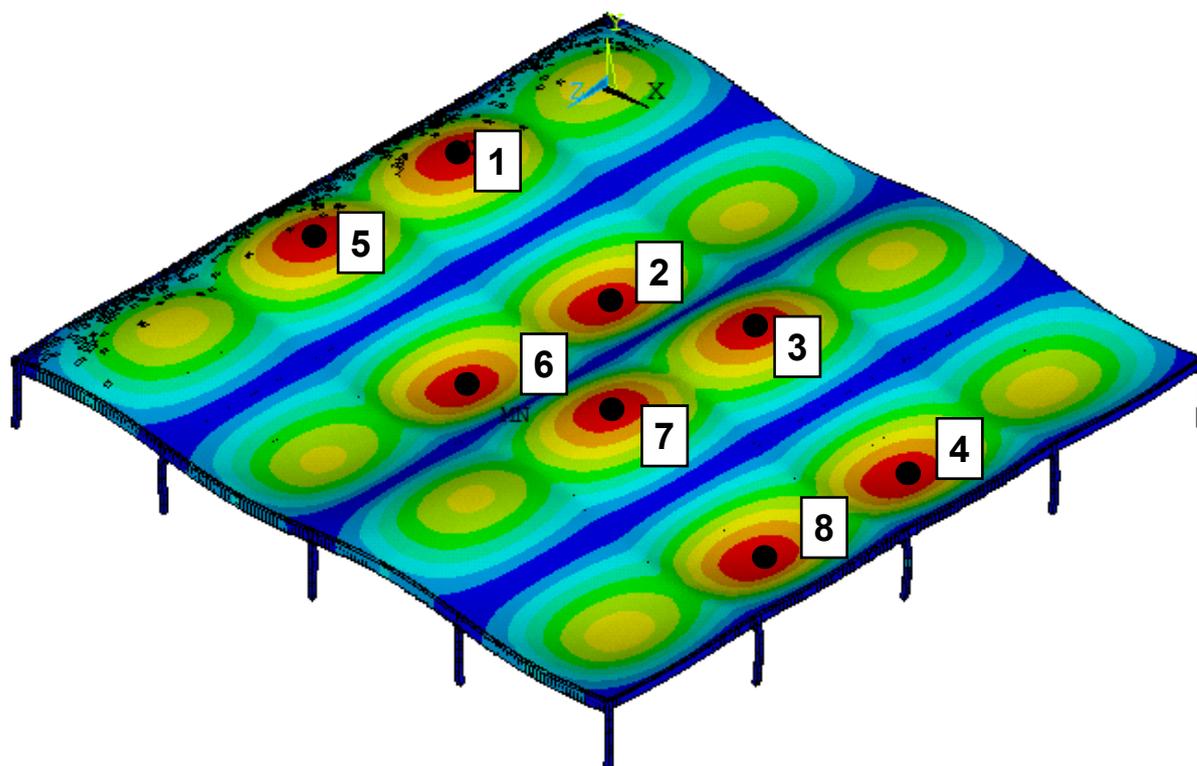


Figura 131 - Posicionamento dos pontos avaliados nas respostas estruturais

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

##### 8.4.1 Domínio do tempo

As respostas dinâmicas do piso misto, em termos de deslocamentos verticais e das respectivas acelerações, são apresentadas para 4 (quatro) situações de carregamento investigadas (SC-1: 16 pessoas, SC-6: 56 pessoas, SC-10: 88 pessoas e SC-15: 128 pessoas), nos respectivos pontos de leitura de maior amplitude de resposta. Deste modo, procura-se analisar a influência das diferentes taxas de ocupação humana sobre o comportamento dinâmico do piso misto.

As Figuras 132 a 135 apresentam os gráficos do deslocamento no domínio do tempo, enquanto as Figuras 136 a 139 ilustram os gráficos da aceleração no domínio do tempo.

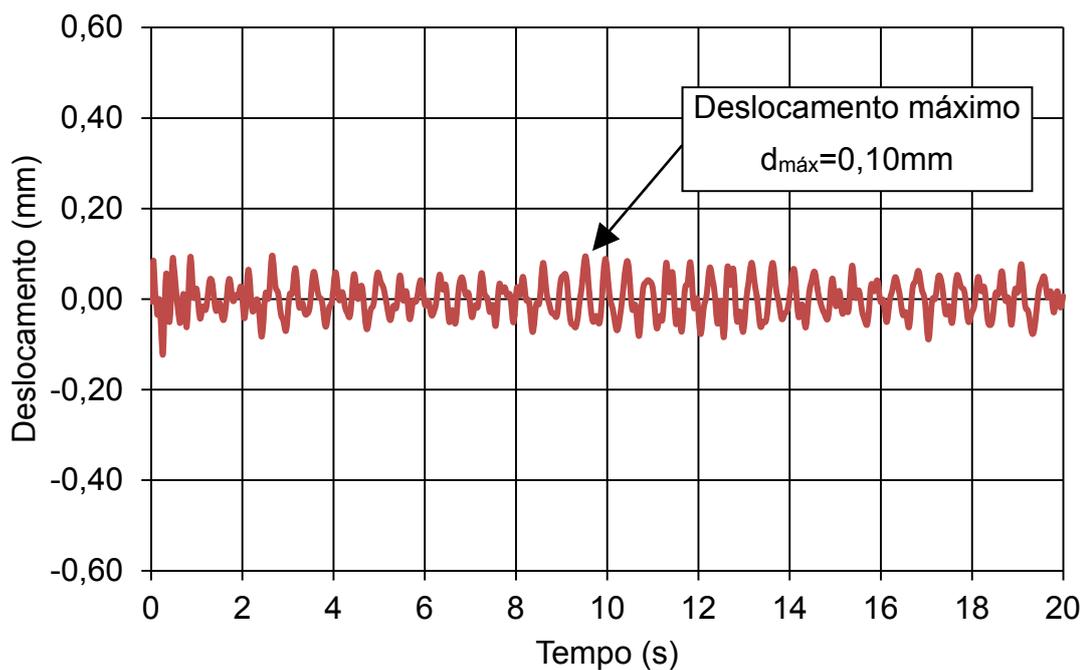


Figura 132 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-1 (16 pessoas; ponto de análise 7)

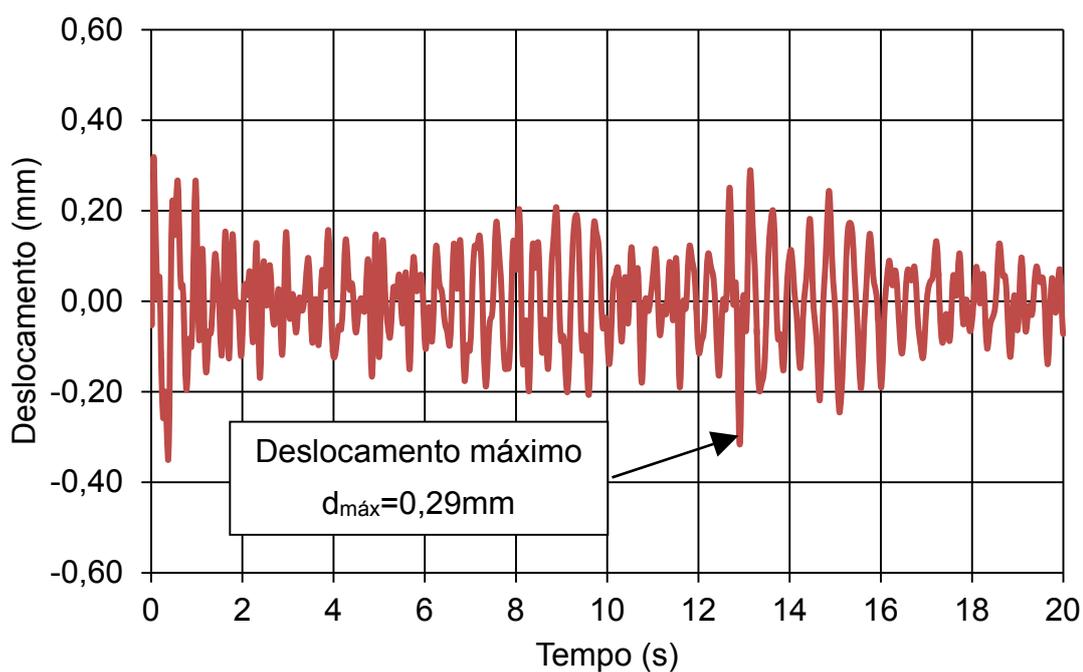


Figura 133 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-6 (56 pessoas; ponto de análise 7)

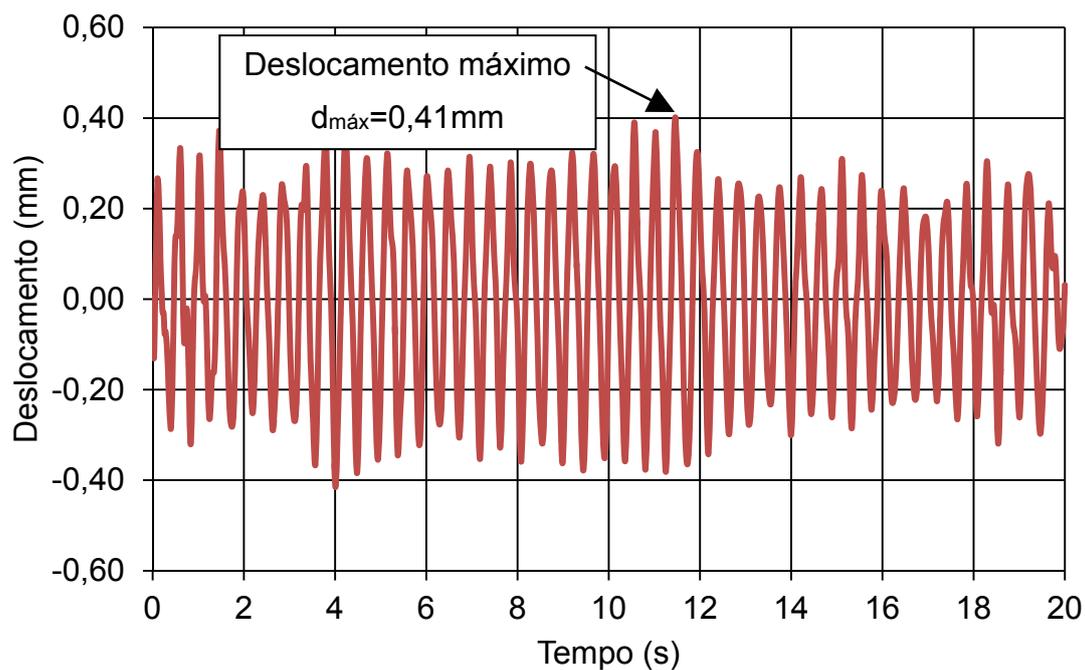


Figura 134 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-10 (88 pessoas; ponto de análise 7)

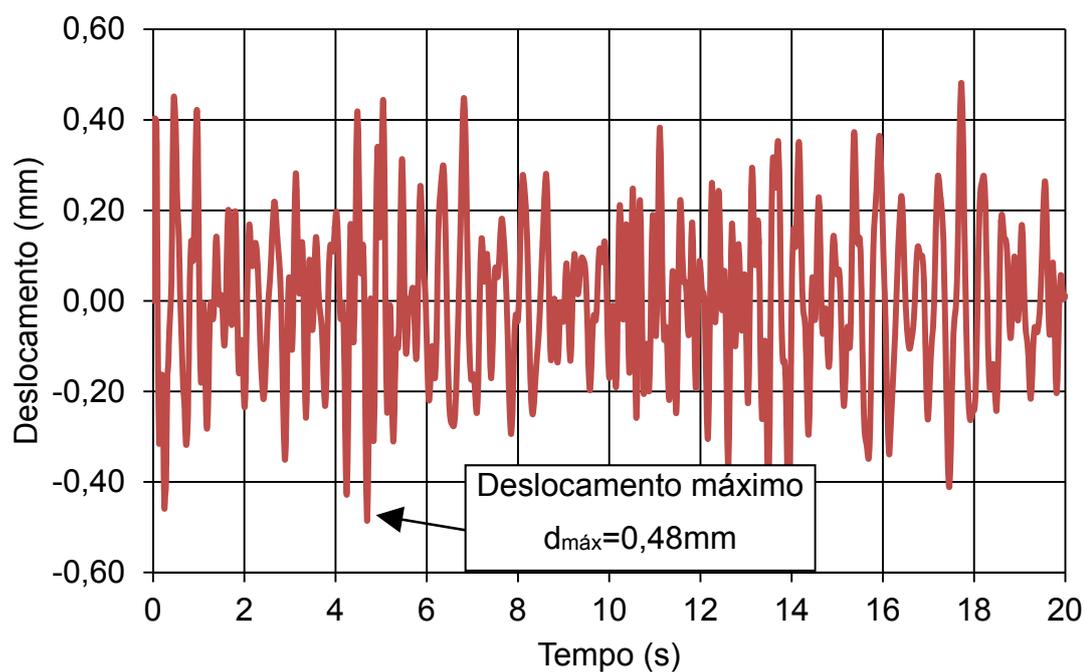


Figura 135 - Deslocamento no domínio do tempo: SC-15 (128 pessoas; ponto de análise 2)

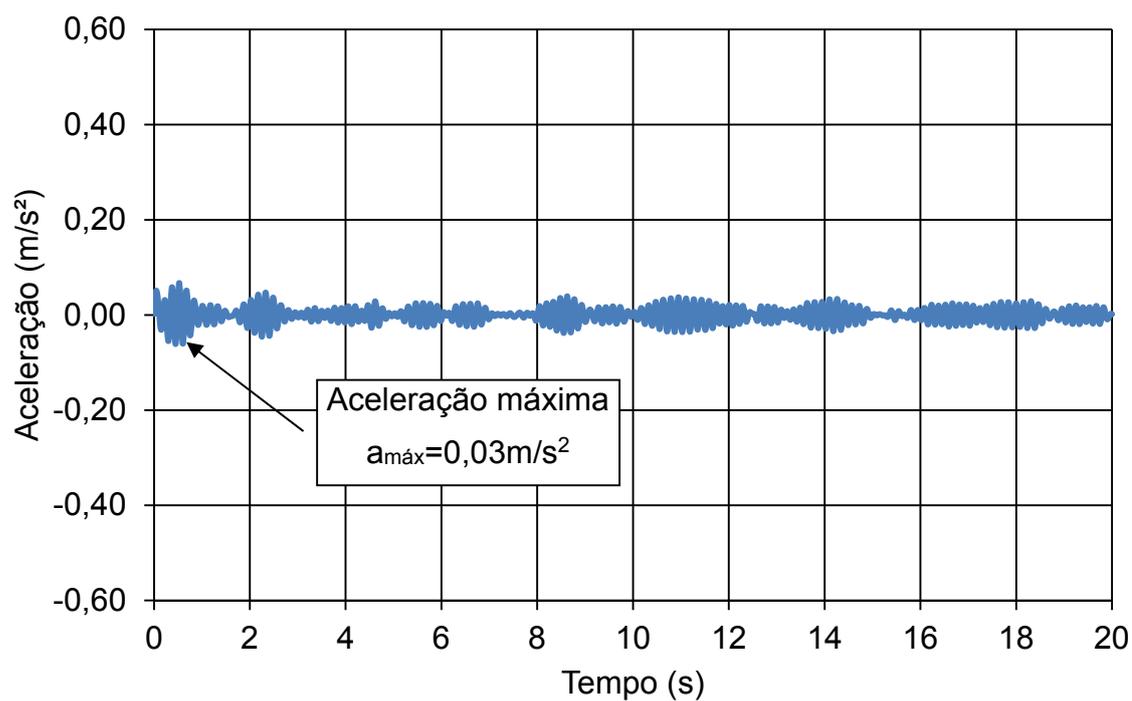


Figura 136 - Aceleração no domínio do tempo: SC-1 (16 pessoas; ponto de análise 7)

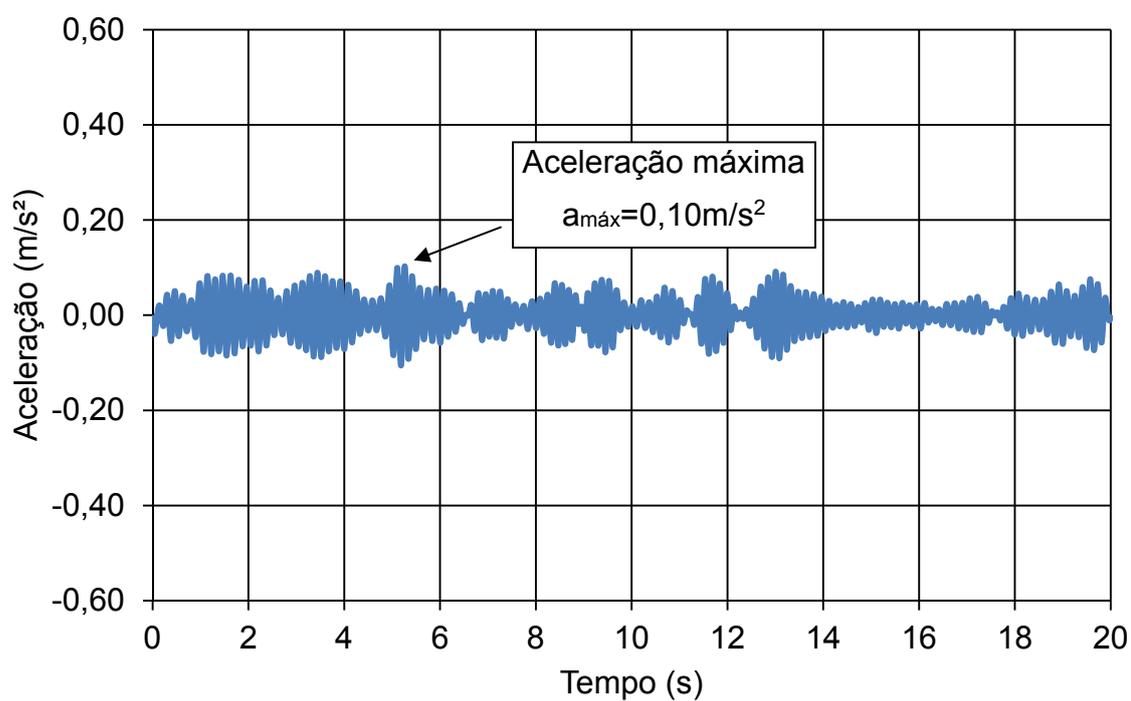


Figura 137 - Aceleração no domínio do tempo: SC-6 (56 pessoas; ponto de análise 7)

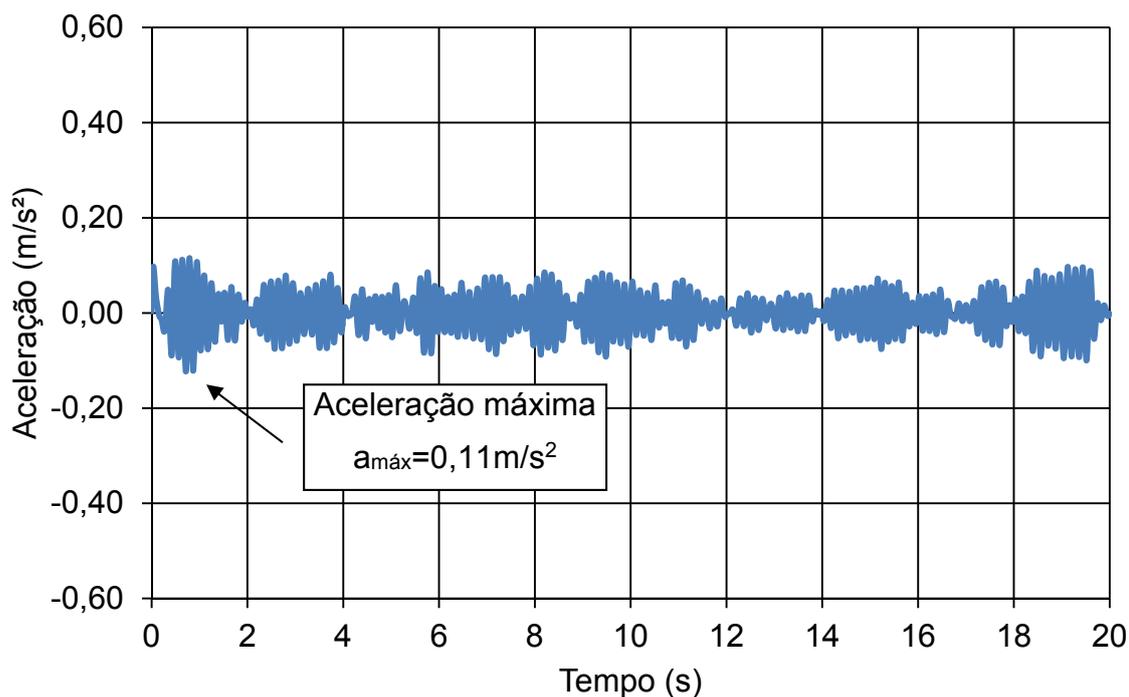


Figura 138 - Aceleração no domínio do tempo: SC-10 (88 pessoas; ponto de análise 7)

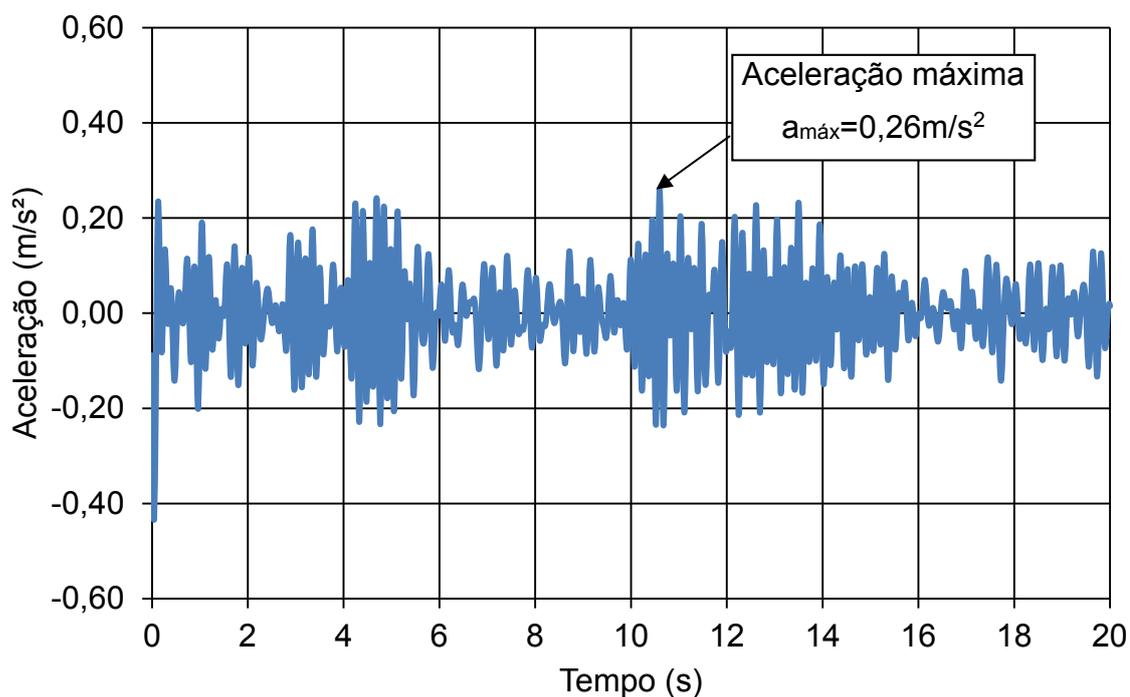


Figura 139 - Aceleração no domínio do tempo: SC-15 (128 pessoas; ponto de análise 2)

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 132 a 139, em termos qualitativos, pode-se verificar que os valores máximos de deslocamento e aceleração foram encontrados quando a laje de concreto foi ocupada por 128 pessoas (SC-15). Neste contexto, os valores mínimos (deslocamentos e

acelerações) foram obtidos para a situação de carregamento com 16 pessoas (situação de carregamento SC-1). Portanto, verificou-se que os valores dos deslocamentos e das acelerações da estrutura aumentam à medida que ocorre um aumento na taxa de ocupação sobre o piso misto, demonstrando que o piso misto (aço-concreto) investigado apresenta um comportamento dinâmico esperado. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de quanto maior o número de pessoas realizando movimentos sincronizados, conseqüentemente maior a amplificação da resposta dinâmica da estrutura.

As respostas dinâmicas para a situação de carregamento SC-1 (16 pessoas), em termos do deslocamento e aceleração foram de 0,10 mm e  $0,03\text{m/s}^2$ , enquanto para SC-15 (128 pessoas) encontrou-se 0,48 mm e  $0,26\text{ m/s}^2$ , respectivamente. Conseqüentemente, nota-se uma grande diferença entre os resultados obtidos para as situações de carregamento SC-1 e SC-15. Em relação às situações de carregamento intermediárias, é possível observar que os deslocamentos e acelerações foram 0,29 mm e  $0,10\text{ m/s}^2$  para a situação de carregamento SC-6, respectivamente, enquanto para SC-10 encontrou-se 0,41 mm e  $0,11\text{ m/s}^2$ .

Em relação ao deslocamento, verificou-se um aumento de 0,10 mm (SC-1) (Figura 132) para 0,48 mm (SC-15) (Figura 135), de modo que a avaliação do conforto humano deste resultado será realizada nos capítulos posteriores.

#### 8.4.2 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 140 a 143 apresentam o deslocamento no domínio da frequência, enquanto as Figuras 144 a 147 apresentam a aceleração no domínio da frequência, para quatro situações (SC-1, SC-6, SC-10 e SC-15), no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica, com o objetivo de representar o comportamento global do piso misto investigado.

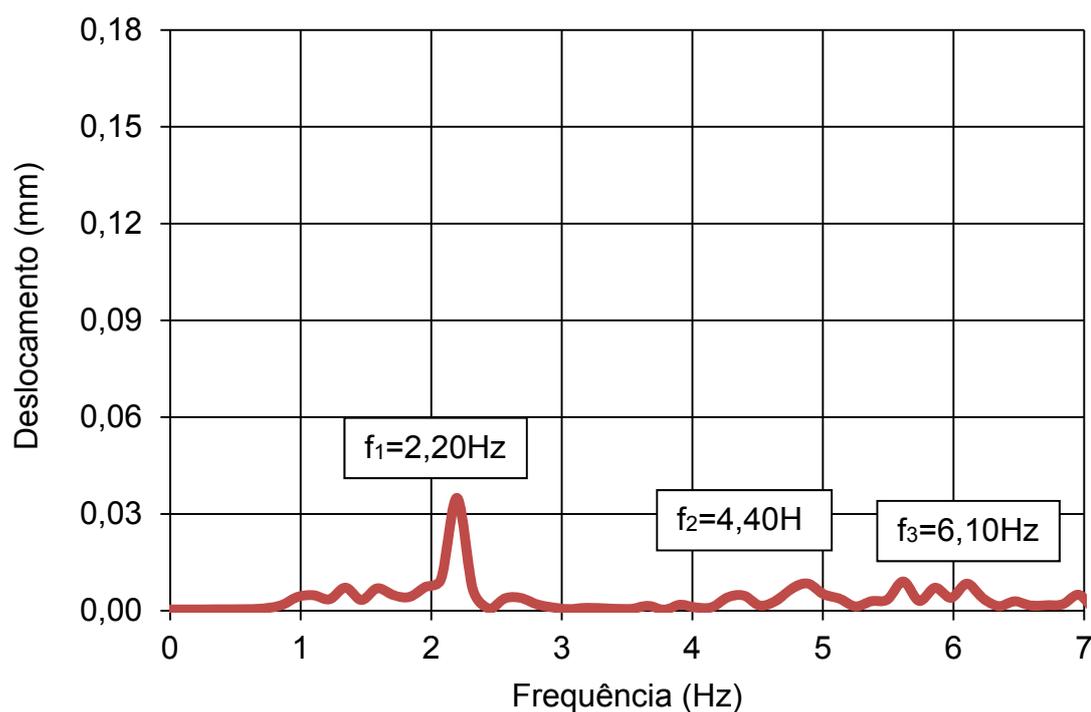


Figura 140 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-1 (16 pessoas; ponto de análise 7)

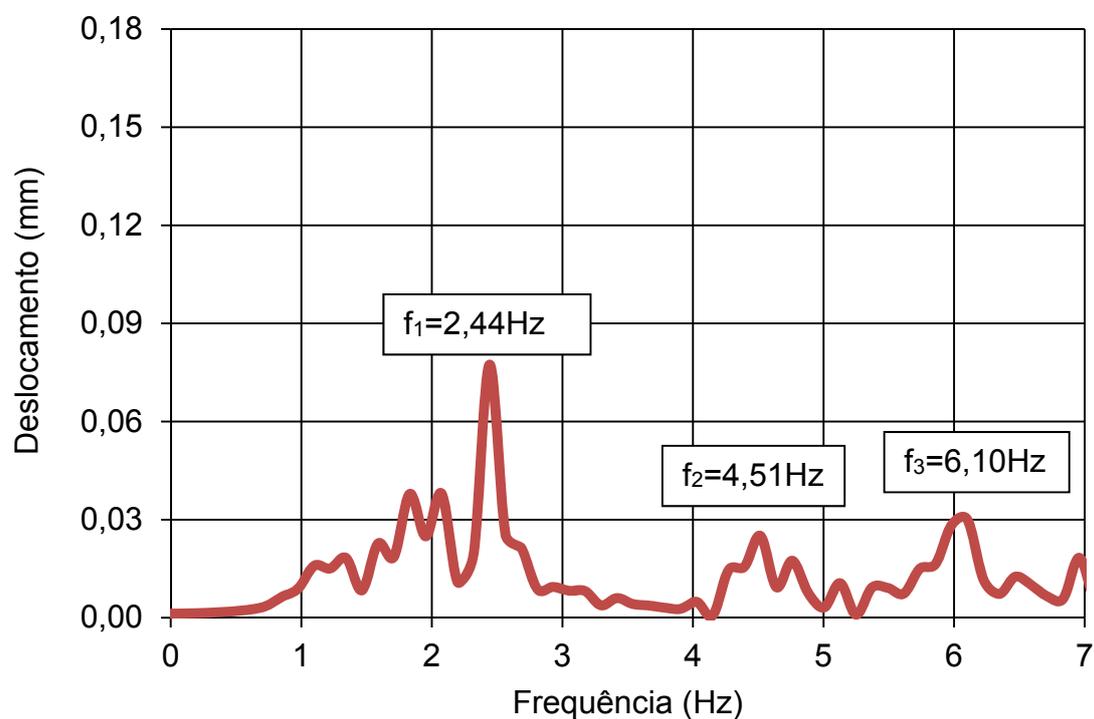


Figura 141 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-6 (56 pessoas; ponto de análise 7)

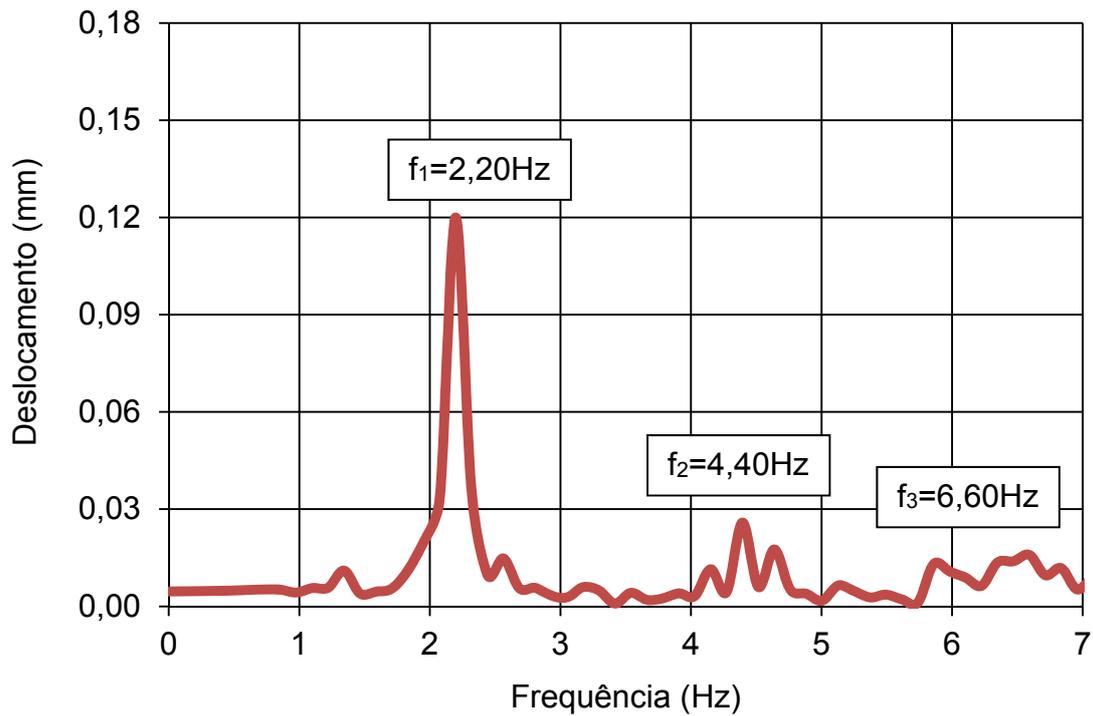


Figura 142 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-10 (88 pessoas; ponto de análise 7)

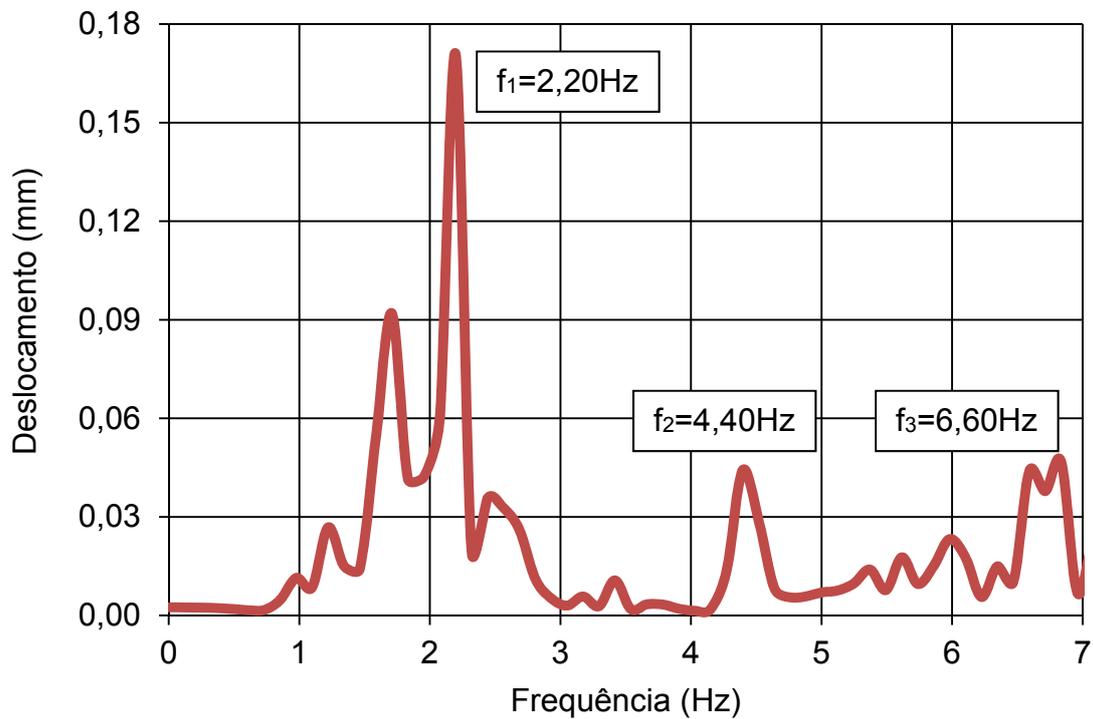


Figura 143 - Deslocamento no domínio da frequência: SC-15 (128 pessoas; ponto de análise 2)

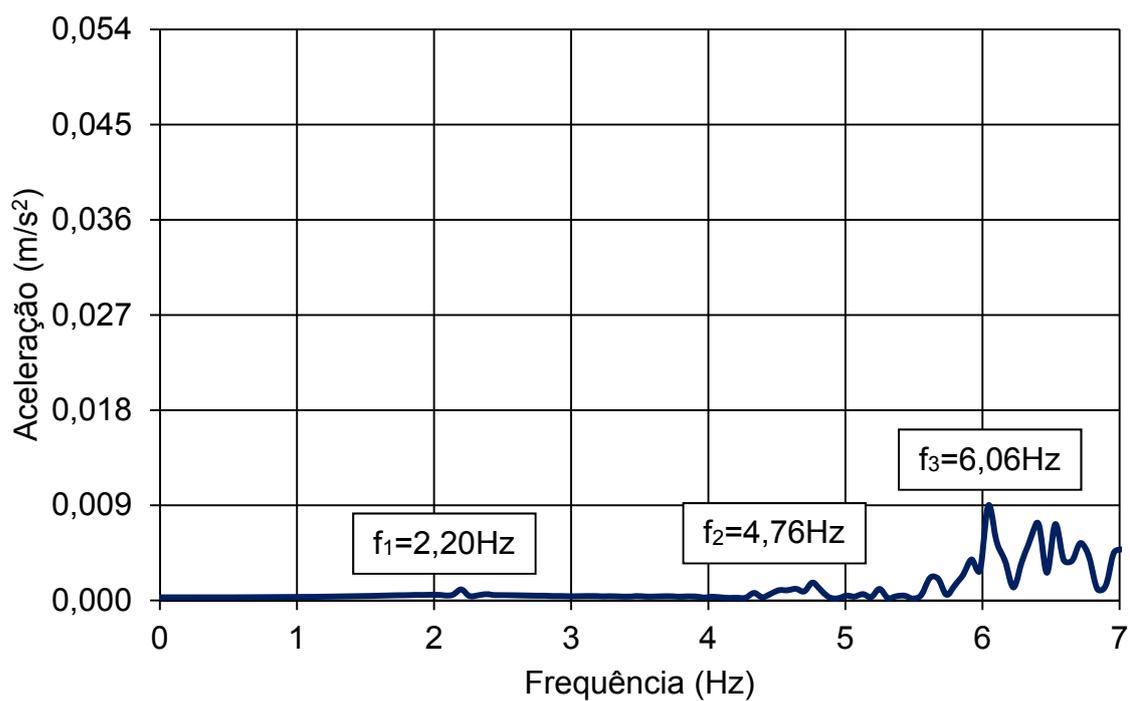


Figura 144 - Aceleração no domínio da frequência: SC-1 (16 pessoas; ponto de análise 7)

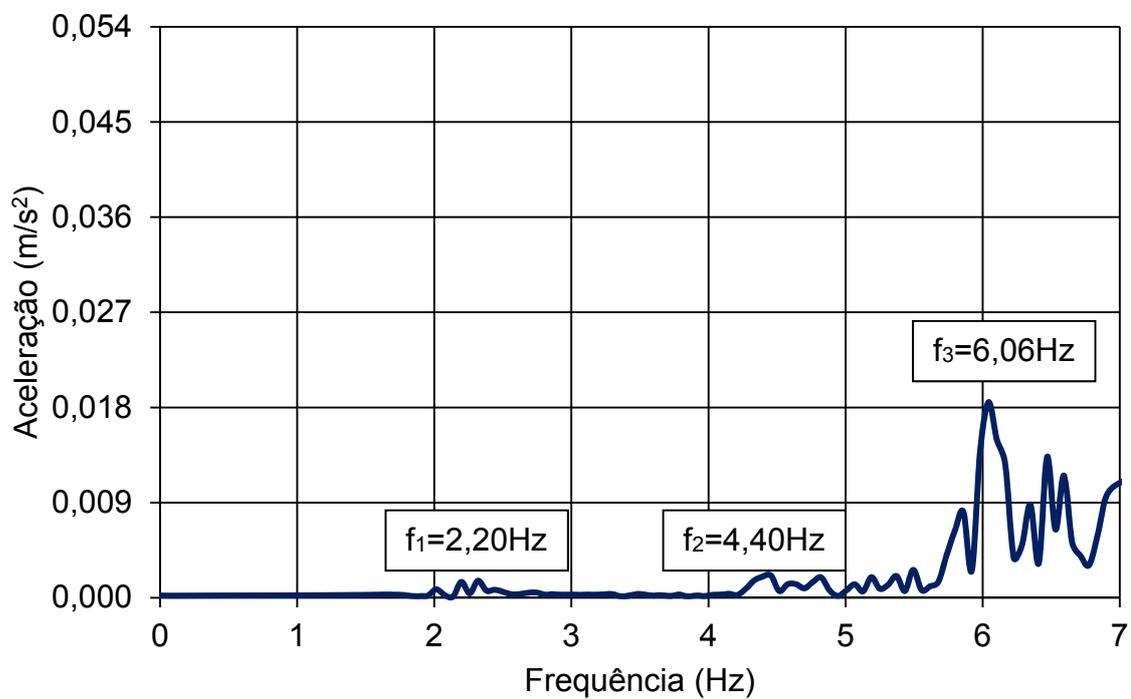


Figura 145 - Aceleração no domínio da frequência: SC-6 (56 pessoas; ponto de análise 7)

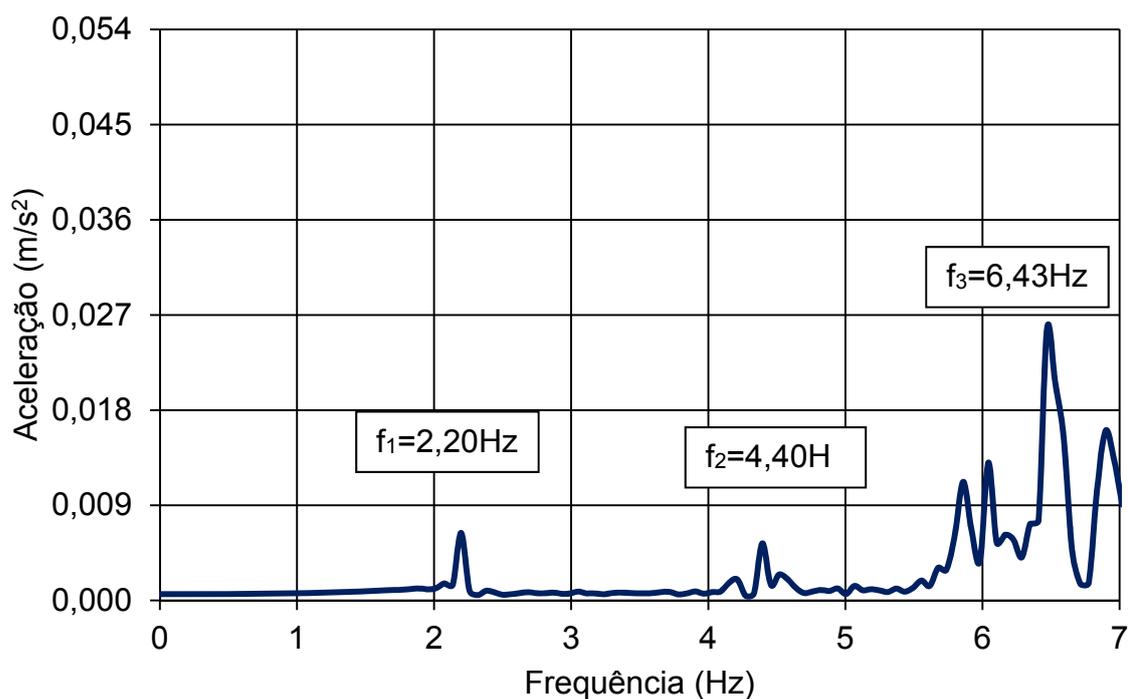


Figura 146 - Aceleração no domínio da frequência: SC-10 (88 pessoas; ponto de análise 7)

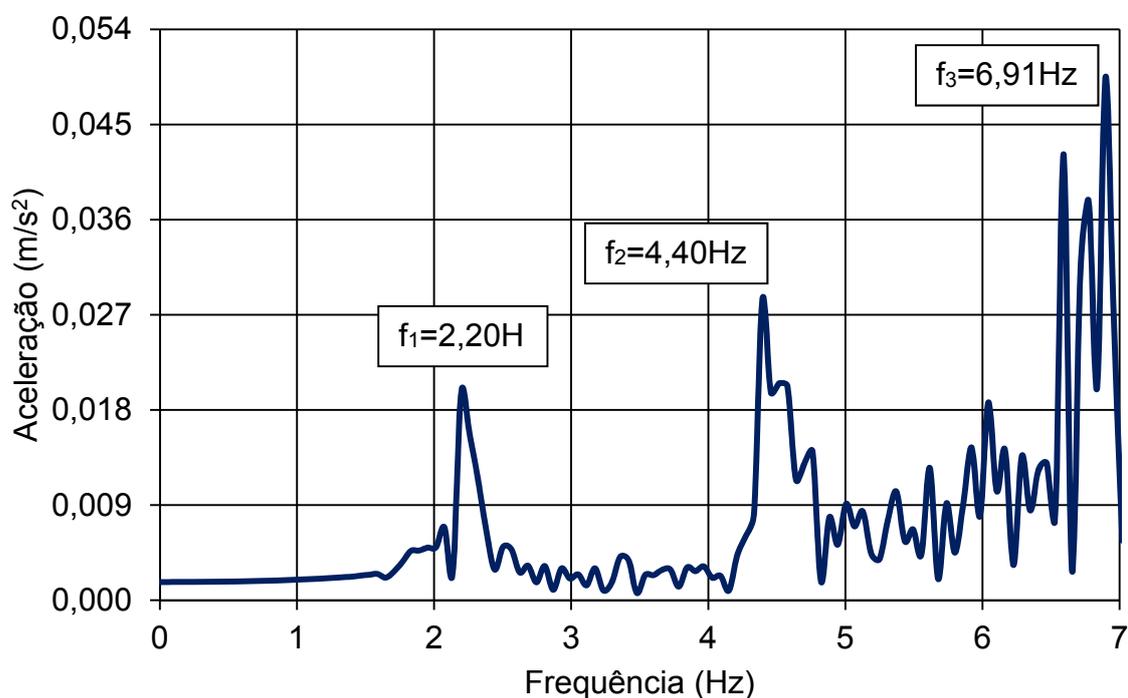


Figura 147 - Aceleração no domínio da frequência: SC-15 (128 pessoas; ponto de análise 2)

As respostas dinâmicas apresentadas nas Figuras 140 a 147, associadas aos deslocamentos e acelerações no domínio da frequência, foram determinadas no eixo vertical Y.

Com base nas Figuras 140 a 143, referentes aos deslocamentos no domínio da frequência, nota-se que as maiores transferências de energia do sistema foram verificadas no primeiro harmônico ( $f=2,20$  Hz). Apesar das baixas transferências de energias apresentadas no terceiro harmônico, observa-se que as ações humanas rítmicas ativaram um modo de vibração associado a uma frequência de excitação distinta, ou seja, a frequência de 6,10 Hz, corroborando com as conclusões obtidas por Ji e Ellis (1997).

Em relação à aceleração no domínio da frequência, as Figuras 144 a 147 constataram que as maiores transferências de energia do sistema foram verificadas no terceiro harmônico, nas frequências de 6,06Hz, 6,06 Hz, 6,43 Hz e 6,91Hz, referentes às situações de carregamento SC-1, SC-6, SC-10 e SC-15, respectivamente. Desta maneira, foram mobilizar modos de vibração, associados as frequências naturais da estrutura, variando de acordo com as características dinâmicas dos indivíduos e, também, conforme a situação de carregamento investigada. Deste modo, a modelagem dos sistemas biodinâmicos torna-se relevante, pois mobiliza modos de vibração próximos a faixa de ressonância da estrutura.

Observa-se que à medida que se aumenta o número de pessoas, maior a transferência de energia para o sistema estrutural. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de quanto maior o número de pessoas realizando movimentos sincronizados, conseqüentemente maior a amplificação da resposta dinâmica da estrutura.

É possível verificar a relação entre a transferência de energia e a relação  $M_p/M_e$  (%) ( $M_p$ : massa das pessoas;  $M_e$ : massa do piso misto), pois nota-se quanto maior a relação  $M_p/M_e$  (%), ou seja, o crescente aumento do número de pessoas sobre o piso misto, a transferência de energia do sistema é maior, tanto para deslocamento quanto aceleração no domínio da frequência (ver Figuras 139 a 146).

#### 8.4.3 Comparação entre as situações de carregamento SC-1 e SC-15

As respostas dinâmicas, provenientes da aplicação das situações de carregamento SC-1 e SC-15, foram determinadas nos pontos de leitura de maior amplitude. A comparação entre a situação de carregamento com menor taxa de ocupação (SC-1: 16 pessoas; ver Figura 116) e maior taxa de ocupação (SC-15: 128 pessoas; ver Figura 130) foi realizada com o intuito de investigar a influência do número de pessoas sobre o comportamento dinâmico do piso misto. As Figuras 148 a 151 apresentam a comparação entre as situações de carregamento SC-1 e SC-15 nos pontos de leitura de maior amplitude.

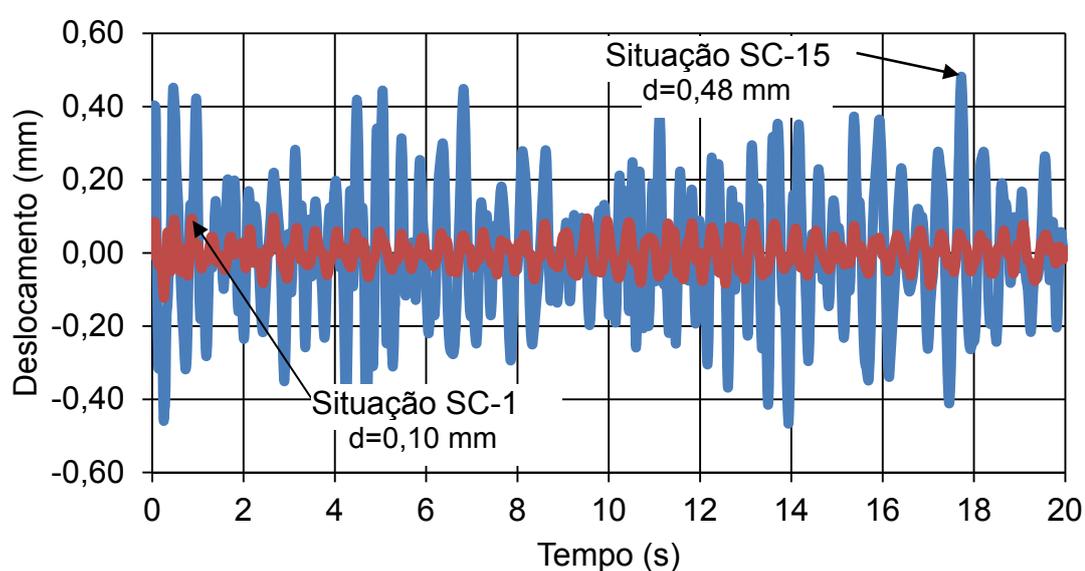


Figura 148 - Espectros de deslocamento, no domínio do tempo: SC-1 e SC-15

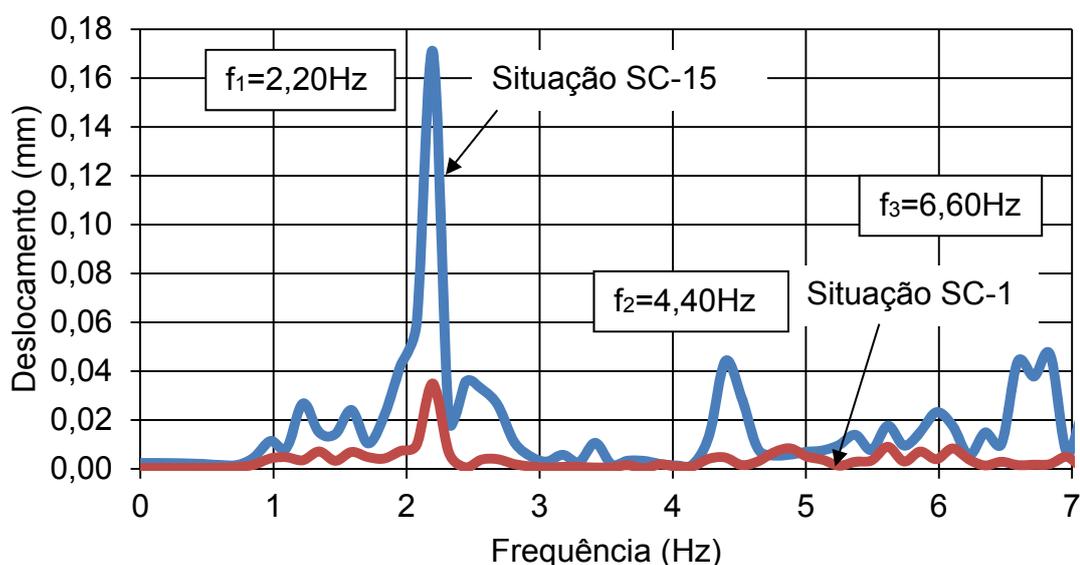


Figura 149 - Espectros de deslocamento, no domínio da frequência: SC-1 e SC-15

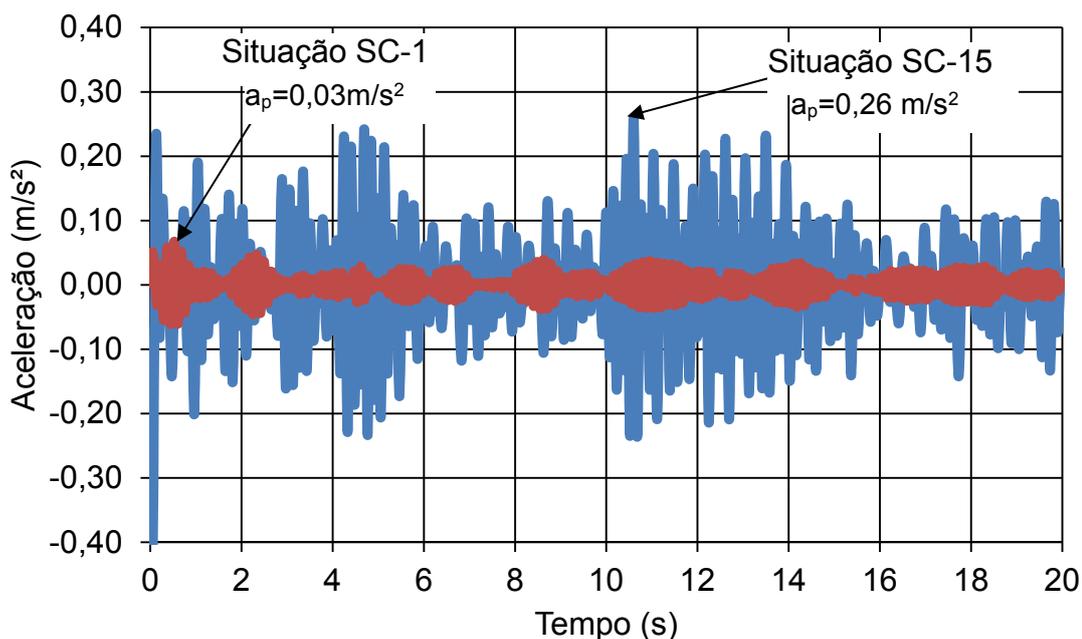


Figura 150 - Espectros de aceleração, no domínio do tempo: SC-1 e SC-5

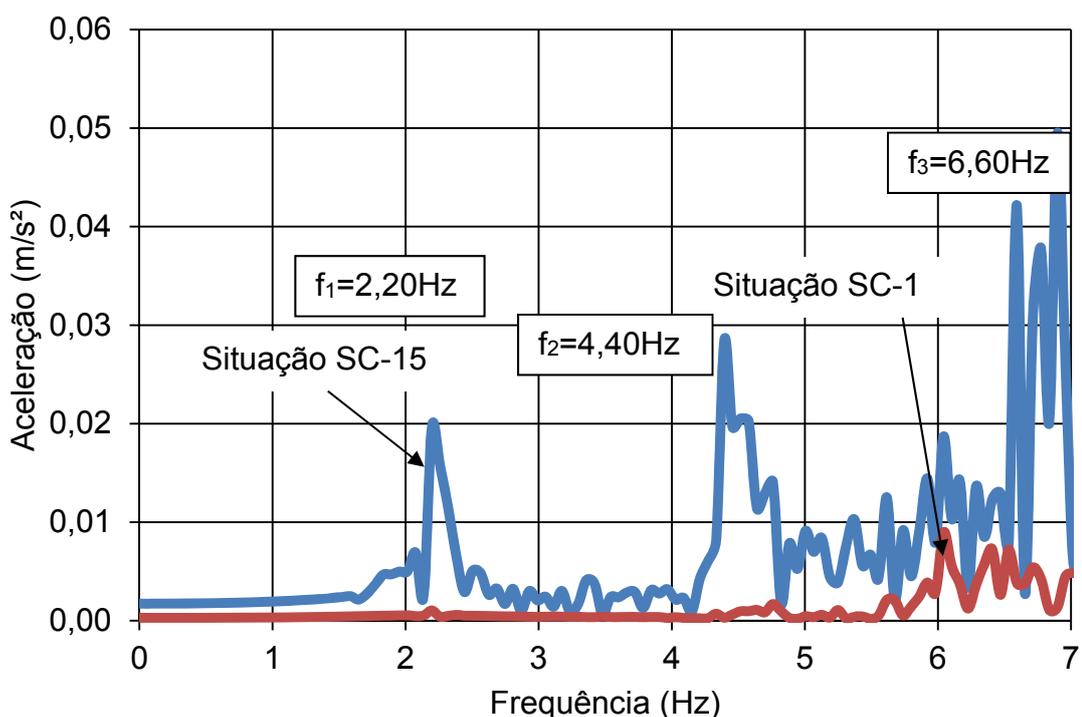


Figura 151 - Espectros de aceleração, no domínio da frequência: SC-1 e SC-5

A influência da ocupação das pessoas sobre o sistema estrutural é evidente nas Figuras 148 a 151, uma vez que as transferências de energia ao sistema, associadas aos deslocamentos e acelerações, foram significativamente maiores para a situação de carregamento SC-15 (128 pessoas) ao se comparar com a situação de carregamento SC-1 (16 pessoas). Portanto, nota-se, que quanto maior a

taxa de ocupação presente sobre o sistema estrutural, maior é a amplitude da resposta estrutural e conseqüentemente a transferência de energia para o sistema estrutural é maior.

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

As Tabelas 33 a 47 apresentam os valores da aceleração de pico, aceleração em RMS e valores de doses de vibração (VDV), nos oito pontos de leitura. Esses valores foram fornecidos através da análise quantitativa realizada para as quinze diferentes situações de carregamento.

Tabela 33 - Acelerações verticais máximas: SC-1

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,037	0,028	0,079
2	0,030	0,025	0,063
3	0,045	0,031	0,074
4	0,023	0,017	0,092
5	0,034	0,025	0,067
6	0,056	0,032	0,085
7	<b>0,070</b>	<b>0,051</b>	<b>0,122</b>
8	0,065	0,038	0,083

Ilustração da situação estudada

16 pessoas

Tabela 34 - Acelerações verticais máximas: SC-2

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,RMS}$ (RMS)	
1	0,039	0,033	0,086
<b>2</b>	<b>0,076</b>	<b>0,061</b>	<b>0,131</b>
3	0,067	0,040	0,108
4	0,073	0,038	0,084
5	0,056	0,037	0,081
6	0,072	0,035	0,108
7	0,040	0,041	0,075
8	0,057	0,030	0,066

Ilustração da situação estudada

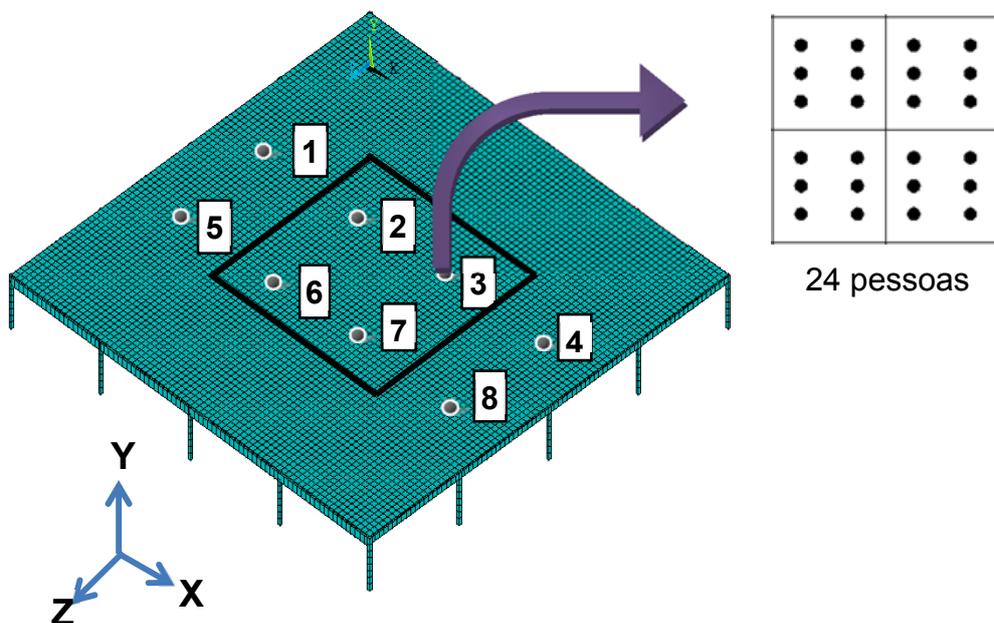


Tabela 35 - Acelerações verticais máximas: SC-3

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,RMS}$ (RMS)	
1	0,064	0,043	0,135
2	0,052	0,055	0,123
<b>3</b>	<b>0,083</b>	<b>0,070</b>	<b>0,155</b>
4	0,060	0,047	0,130
5	0,075	0,037	0,112
6	0,082	0,051	0,143
7	0,051	0,034	0,102
8	0,077	0,046	0,125

Ilustração da situação estudada

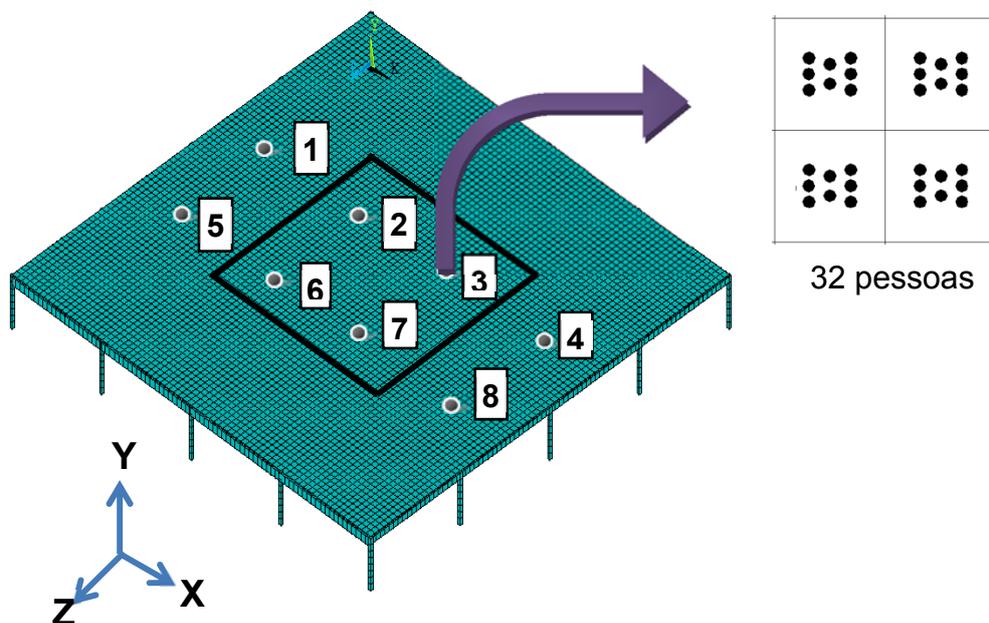


Tabela 36 - Acelerações verticais máximas: SC-4

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,077	0,050	0,119
2	0,069	0,037	0,104
<b>3</b>	<b>0,088</b>	<b>0,075</b>	<b>0,162</b>
4	0,082	0,060	0,128
5	0,056	0,042	0,081
6	0,065	0,050	0,079
7	0,068	0,055	0,087
8	0,073	0,045	0,092

Ilustração da situação estudada

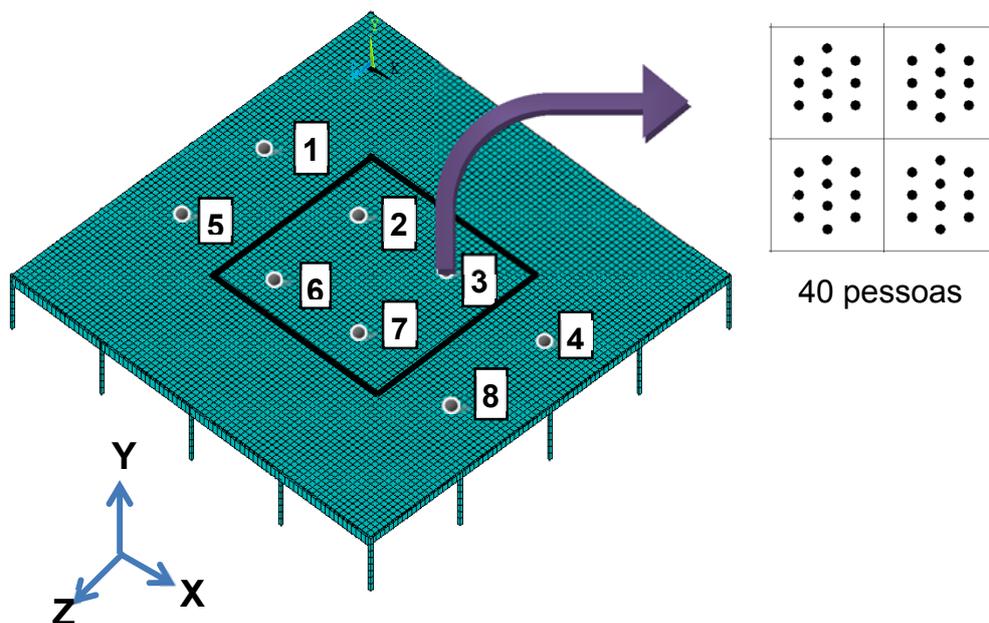
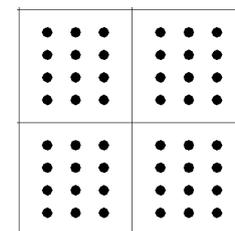
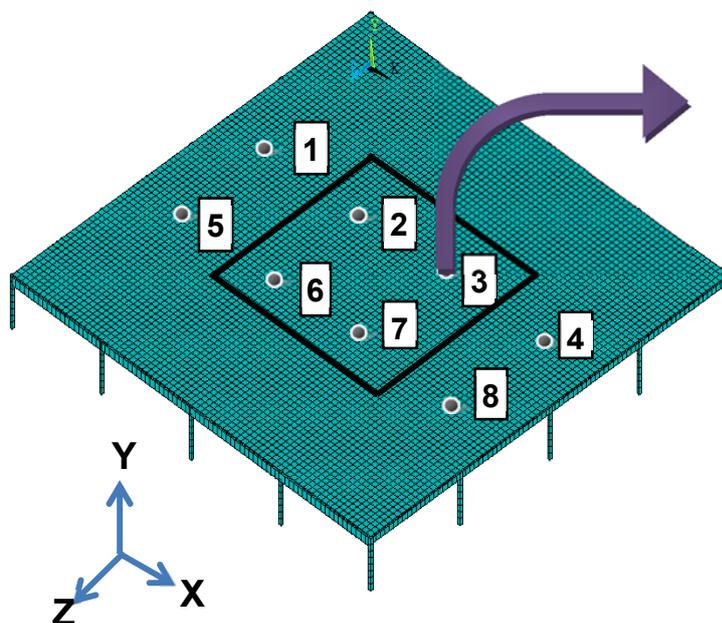


Tabela 37 - Acelerações verticais máximas: SC-5

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,085	0,060	0,171
2	0,092	0,073	0,178
<b>3</b>	<b>0,095</b>	<b>0,081</b>	<b>0,182</b>
4	0,075	0,070	0,138
5	0,065	0,059	0,126
6	0,087	0,062	0,157
7	0,068	0,064	0,132
8	0,070	0,055	0,127

Ilustração da situação estudada



48 pessoas

Tabela 38 - Acelerações verticais máximas: SC-6

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,065	0,065	0,124
2	0,084	0,076	0,158
3	0,088	0,076	0,156
4	0,093	0,070	0,185
5	0,076	0,073	0,139
6	0,083	0,078	0,174
7	<b>0,100</b>	<b>0,083</b>	<b>0,191</b>
8	0,092	0,062	0,188

Ilustração da situação estudada

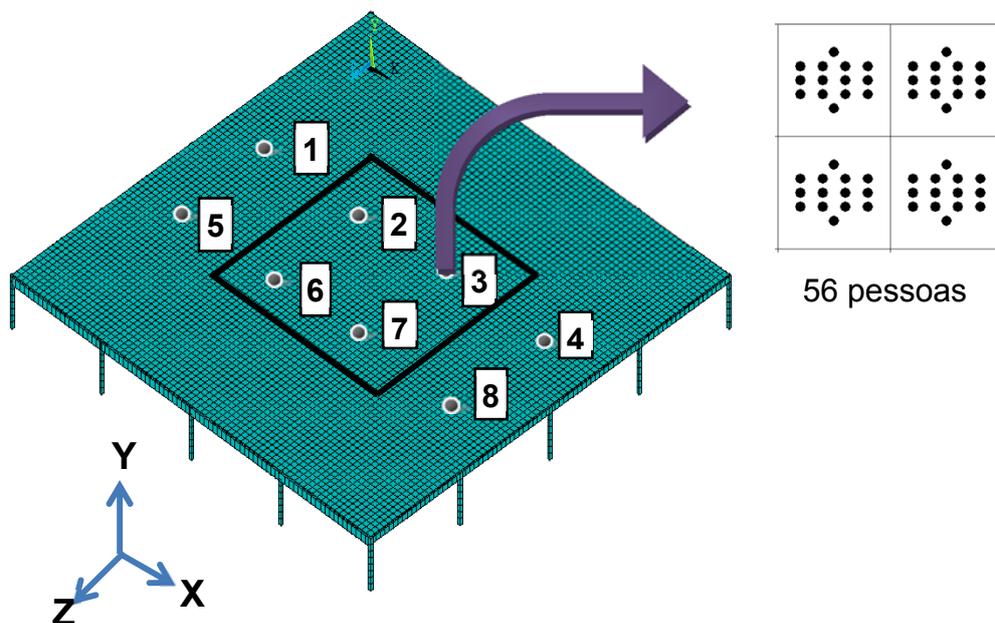


Tabela 39 - Acelerações verticais máximas: SC-7

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,099	0,069	0,112
2	0,078	0,094	0,211
3	0,096	0,109	0,120
4	0,074	0,077	0,136
5	0,089	0,082	0,176
<b>6</b>	<b>0,103</b>	<b>0,095</b>	<b>0,198</b>
7	0,101	0,088	0,182
8	0,093	0,075	0,130

Ilustração da situação estudada

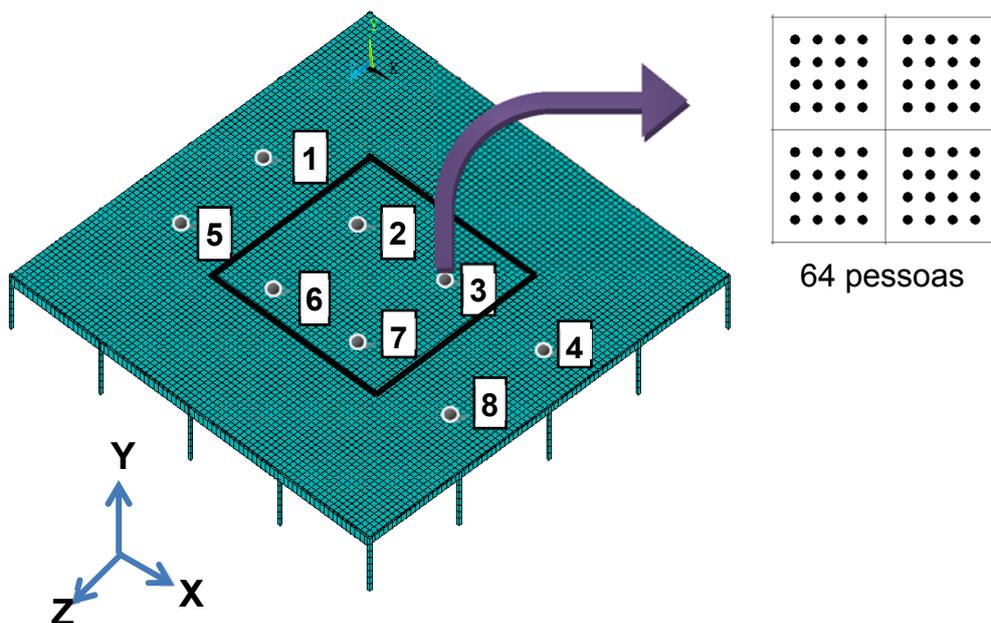


Tabela 40 - Acelerações verticais máximas: SC-8

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,056	0,073	0,108
2	0,070	0,078	0,137
3	0,058	0,082	0,123
4	0,095	0,068	0,174
5	0,083	0,067	0,152
<b>6</b>	<b>0,106</b>	<b>0,098</b>	<b>0,203</b>
7	0,099	0,082	0,147
8	0,078	0,065	0,119

Ilustração da situação estudada

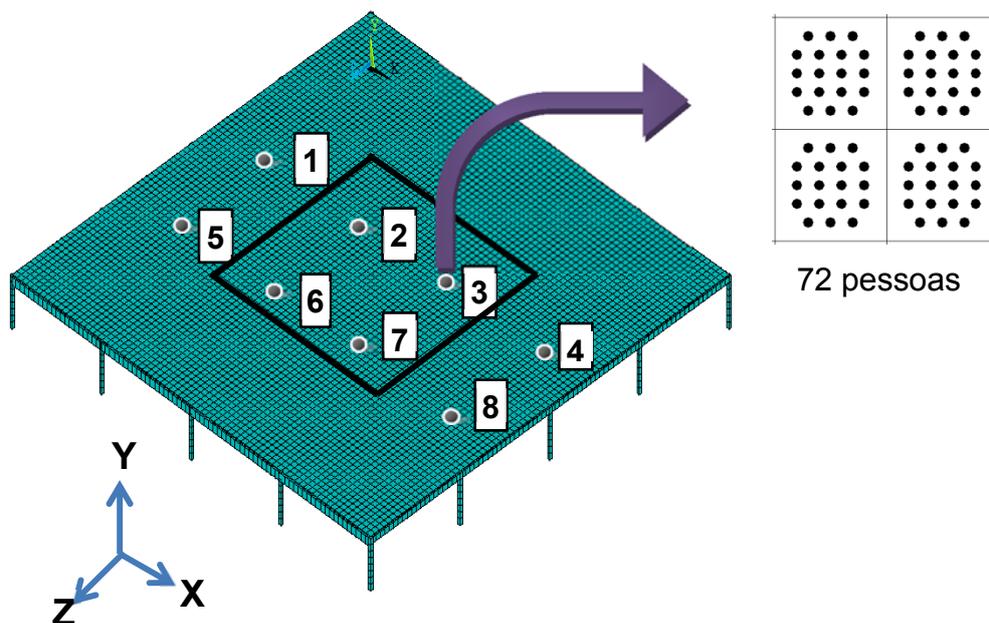


Tabela 41 - Acelerações verticais máximas: SC-9

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,100	0,089	0,187
2	0,079	0,080	0,124
<b>3</b>	<b>0,108</b>	<b>0,100</b>	<b>0,205</b>
4	0,070	0,076	0,135
5	0,092	0,072	0,169
6	0,081	0,086	0,154
7	0,097	0,088	0,183
8	0,083	0,072	0,142

Ilustração da situação estudada

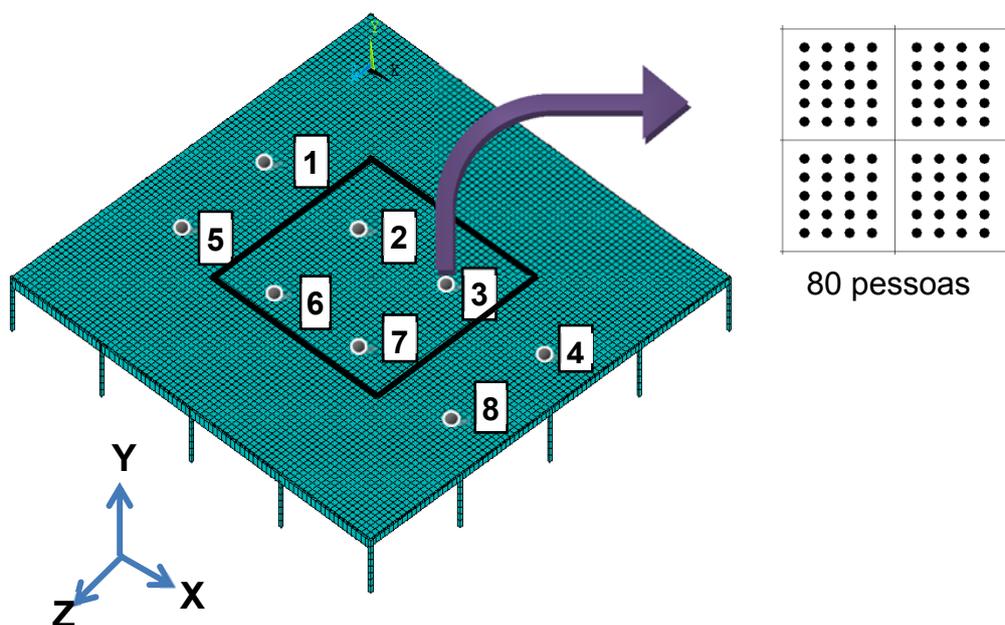


Tabela 42 - Acelerações verticais máximas: SC-10

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,073	0,063	0,128
2	0,085	0,069	0,154
3	0,078	0,064	0,136
4	0,093	0,085	0,187
5	0,100	0,079	0,204
6	0,105	0,097	0,198
7	<b>0,112</b>	<b>0,105</b>	<b>0,215</b>
8	0,097	0,081	0,198

Ilustração da situação estudada

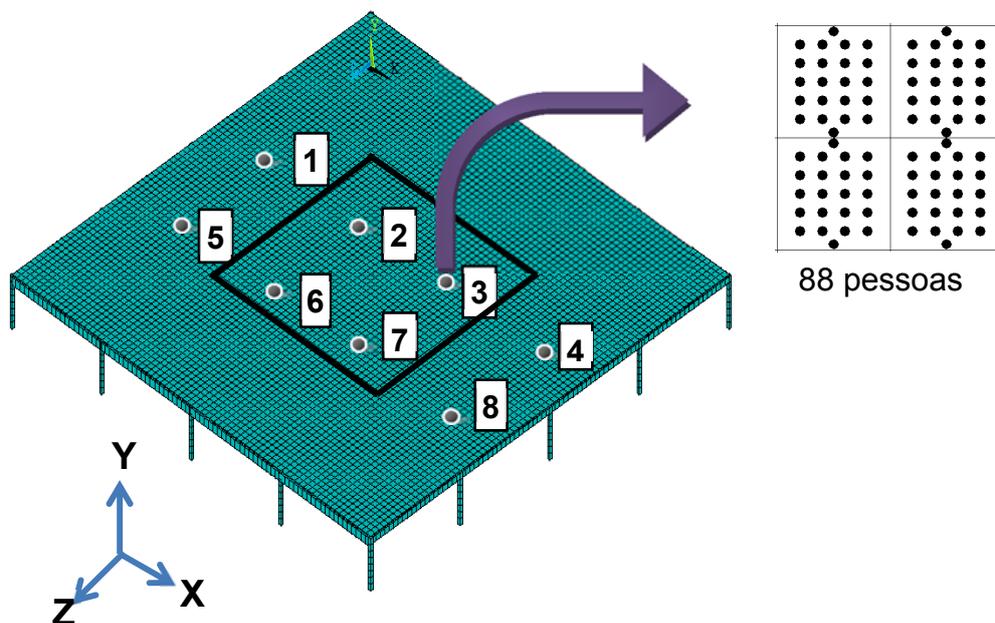


Tabela 43 - Acelerações verticais máximas: SC-11

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,129	0,089	0,223
2	0,112	0,078	0,210
<b>3</b>	<b>0,157</b>	<b>0,128</b>	<b>0,309</b>
4	0,094	0,086	0,178
5	0,095	0,080	0,200
6	0,121	0,079	0,209
7	0,104	0,082	0,198
8	0,083	0,075	0,146

Ilustração da situação estudada

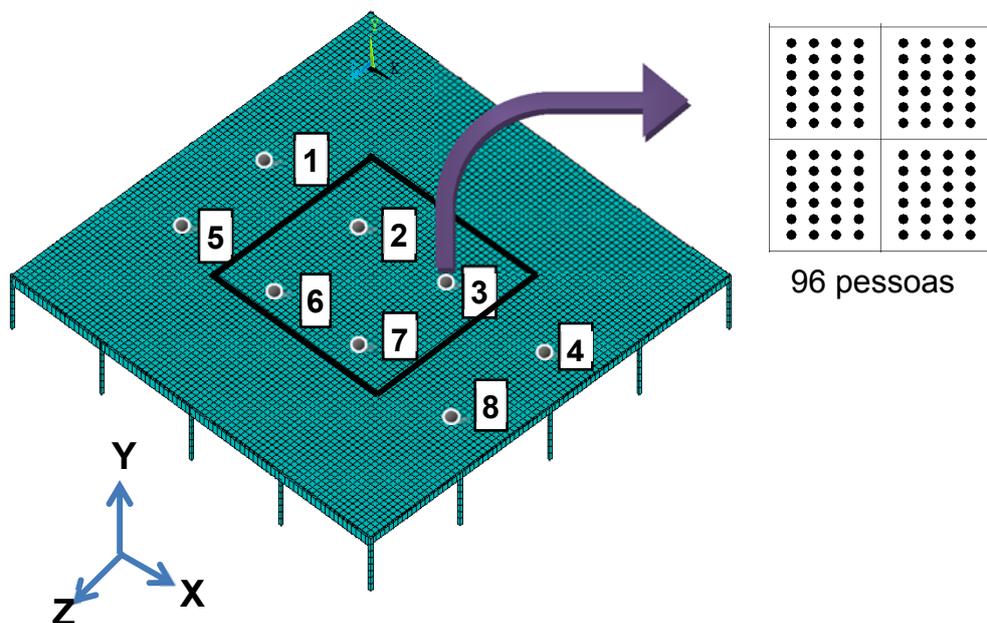


Tabela 44 - Acelerações verticais máximas: SC-12

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	$a_p$ (pico)	$a_{w,RMS}$ (RMS)	
1	0,100	0,094	0,184
2	0,125	0,101	0,214
<b>3</b>	<b>0,173</b>	<b>0,134</b>	<b>0,337</b>
4	0,145	0,098	0,269
5	0,120	0,093	0,224
6	0,113	0,098	0,203
7	0,126	0,104	0,247
8	0,100	0,083	0,193

Ilustração da situação estudada

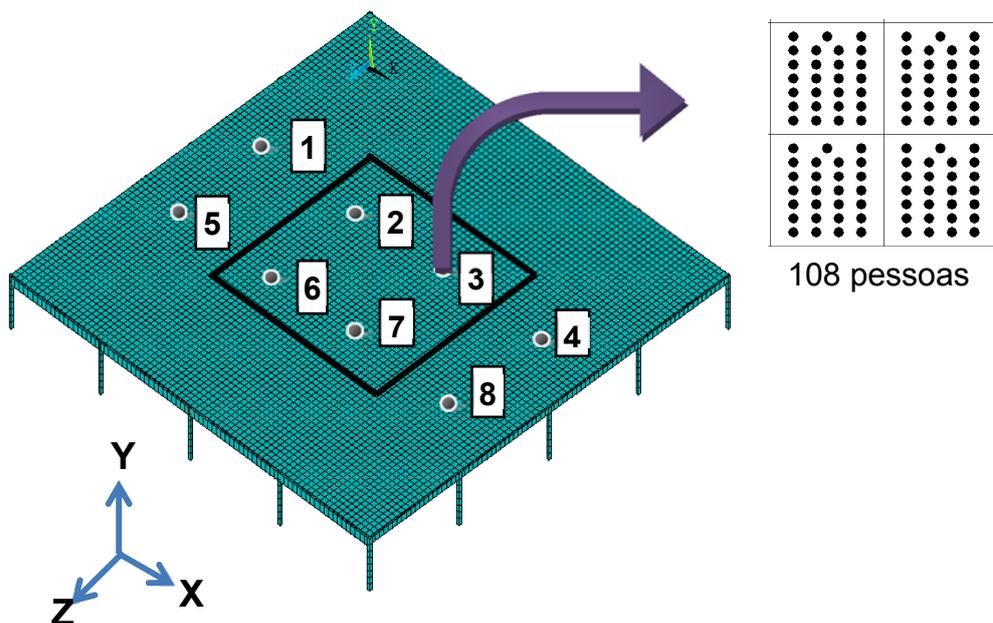


Tabela 45 - Acelerações verticais máximas: SC-13

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,115	0,084	0,234
2	0,160	0,106	0,263
3	0,142	0,112	0,287
4	0,180	0,121	0,323
5	0,139	0,087	0,262
6	0,149	0,110	0,283
7	<b>0,218</b>	<b>0,177</b>	<b>0,402</b>
8	0,144	0,123	0,279

Ilustração da situação estudada

112 pessoas

Tabela 46 - Acelerações verticais máximas: SC-14

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,142	0,096	0,275
2	0,124	0,106	0,241
<b>3</b>	<b>0,237</b>	<b>0,189</b>	<b>0,445</b>
4	0,156	0,094	0,296
5	0,141	0,119	0,277
6	0,178	0,119	0,359
7	0,207	0,105	0,429
8	0,179	0,081	0,298

Ilustração da situação estudada

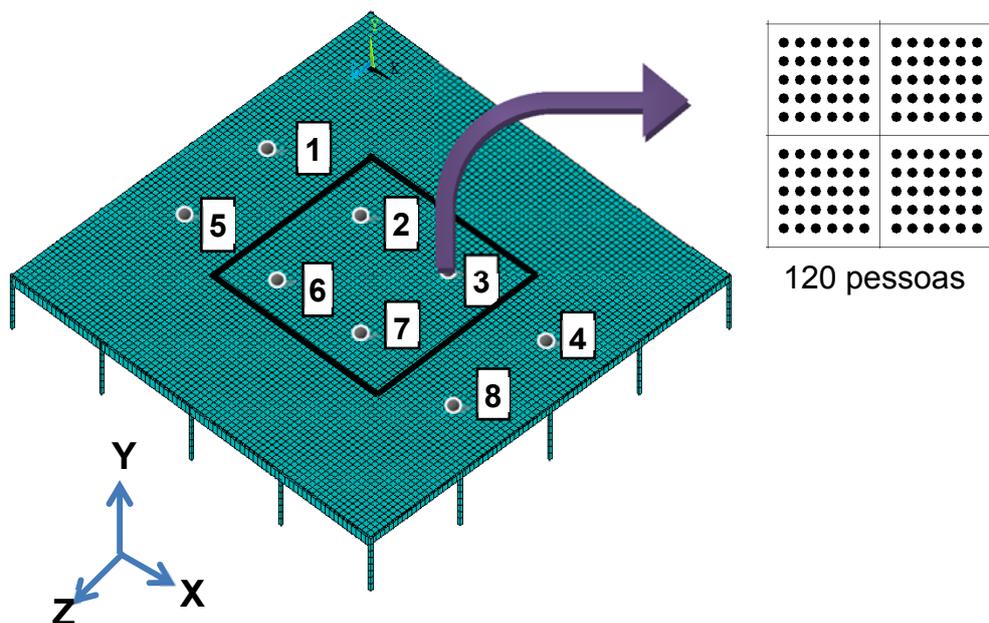
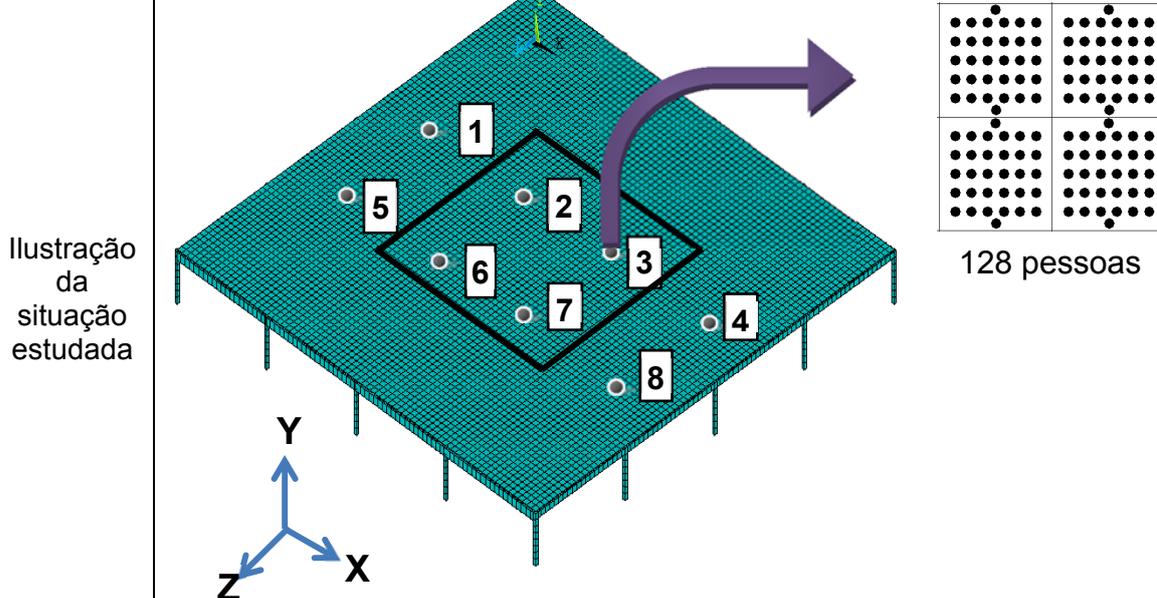


Tabela 47 - Acelerações verticais máximas: SC-15

Ponto de leitura	Acelerações (m/s <sup>2</sup> )		VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
	a <sub>p</sub> (pico)	a <sub>w,RMS</sub> (RMS)	
1	0,233	0,195	0,458
<b>2</b>	<b>0,259</b>	<b>0,213</b>	<b>0,486</b>
3	0,155	0,117	0,302
4	0,176	0,138	0,325
5	0,217	0,198	0,407
6	0,181	0,165	0,349
7	0,200	0,196	0,387
8	0,208	0,187	0,396



Analisando as Tabelas 33 a 47, observa-se que os valores máximos de aceleração de pico, *RMS* e em valores de doses de vibração (VDV) foram encontrados na situação de carregamento SC-15 (ver Figura 130), relacionada à ocupação de 128 pessoas sobre o piso misto. As respostas encontradas, em termos da aceleração, foram da ordem de 0,259m/s<sup>2</sup> (a<sub>p</sub>=0,259m/s<sup>2</sup>), 0,213m/s<sup>2</sup>

( $a_{RMS}=0,213\text{m/s}^2$ ) e  $0,486\text{m/s}^{1,75}$  ( $VDV=0,486\text{m/s}^{1,75}$ ), respectivamente, no ponto de leitura 2 (ver Figura 131).

Por outro lado, a situação de carregamento SC-1 (ver Figura 116) apresentou as menores respostas dinâmicas, sendo obtidos os valores de  $0,070\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,070\text{m/s}^2$ ),  $0,051\text{m/s}^2$  ( $a_{RMS}=0,051\text{m/s}^2$ ) e  $0,122\text{m/s}^{1,75}$  ( $VDV=0,122\text{m/s}^{1,75}$ ), respectivamente, no ponto de leitura 7 (ver Figura 131).

Portanto, verificou-se que o piso misto (aço-concreto) estudado apresenta um comportamento esperado, pois os valores dos deslocamentos e das acelerações da estrutura aumentam à medida que ocorre um aumento na taxa de ocupação sobre o piso misto.

Os valores encontrados para as acelerações de pico, RMS e em valores de doses de vibração (VDV) obtidos em todas as quinze situações de carregamento estudadas neste trabalho de pesquisa (SC-1 a SC-15), em todos os oito pontos de leitura, encontram-se de acordo com a faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida pelo guia de projeto do AISC (Murray, 2016). Em relação às acelerações RMS encontradas, verificou-se que todos os valores obtidos nas seções investigadas não ultrapassam os valores limites aceitáveis estabelecidos pela norma ISO2631/1 (1997) e SCI (2009). Por fim, as acelerações em valores de doses de vibração (VDV), também respeitaram os limites aceitáveis estabelecidos por Setareh (2012) e Ellis e Littler (2004) em todas as seções do piso. Consequentemente, 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.

A maior transferência de energia para o sistema estrutural, devido às atividades humanas rítmicas praticadas, foi verificada na simulação da situação de carregamento SC-15, referente à ocupação máxima do piso misto. Deste modo, quanto maior o carregamento dinâmico, consequentemente a transferência de energia para o sistema estrutural é maior.

Verifica-se que as maiores amplitudes de respostas para as 15 (quinze) situações de carregamento foram determinadas em diferentes pontos de leitura. Tal fato é atribuído a distribuição aleatória das pessoas sobre o piso misto, respeitando apenas os posicionamentos ilustrados nas Figuras 115 a 129. Deste modo, um painel pode estar submetido a uma concentração de pessoas com características

dinâmicas (massa, rigidez e amortecimento) diferentes das outras pessoas presentes nos demais painéis.

Deste modo os máximos valores de aceleração de pico, RMS e valores de doses de vibração (VDV) foram encontrados no ponto de leitura 2 para as situações de carregamento SC-2 e SC-15, além disso, no ponto de leitura 3 para as situações de carregamento SC-3, SC-4, SC- 5 ,SC-9, SC-11 ao SC-12 e SC-14; no ponto de leitura 7 para as situações de carregamento SC-1, SC-6, SC-10 e SC-13 (ver Figura 131).

A partir da avaliação dos resultados presentes nas Tabelas 33 a 47, 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-15) são pouco expressivos, uma vez que o valor da massa total do piso misto é muito superior ao valor da massa do carregamento dinâmico humano.

É importante destacar que a modelagem biodinâmica 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, DA SILVA et al., 2016) demonstram que o modelo biodinâmico fornece 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.

## 8.6 Análise do conforto humano

Esta análise tem o propósito de investigar a situação mais desfavorável do piso misto investigado, no que tange ao desconforto humano oriundo de ações dinâmicas provenientes de atividades aeróbicas. Nesse sentido, as atividades humanas rítmicas, sob uma frequência de excitação humana de 2,20 Hz, foram

sintonizadas ao quarto modo de vibração da estrutura [ $f_4=6,65$  Hz], de modo a induzir um estado de ressonância com o piso misto.

Os resultados das análises transientes (vibração forçada) foram obtidos, ao longo do tempo, em termos das acelerações de pico, RMS e VDV, através da aplicação das 15 situações de carregamento (ver Tabela 31). A Tabela 52 apresenta um resumo dos máximos valores de aceleração encontrados nas quinze situações de carregamento, no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica.

Em seguida foi realizada uma extensa análise paramétrica, visando avaliar os níveis de conforto humano do piso investigado. Para tal, os resultados obtidos, em termos das acelerações de pico no regime permanente ( $a_p$ ), acelerações filtradas RMS ( $a_{w,RMS}$ ) e valores de dose de vibração (VDV) foram comparados e confrontados com os valores limites sob o ponto de vista de conforto humano.

Nestes estudos, utilizou-se o limite estabelecido pelo Guia prático do AISC (Murray et al., 2016) para a aceleração de pico, considerando aceitável a nível de conforto humano a faixa limite entre 4% ( $0,39m/s^2$ ) e 7% ( $0,68m/s^2$ ) da aceleração da gravidade. Em relação aos limites utilizados para as acelerações em RMS, foram considerados neste estudo os limites estabelecidos pela ISO 2631/1 (1997) (ver Tabela 48) e por Smith et al. (2009) (ver Tabela 49). 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 50, e por Ellis e Littler (2004), presente na Tabela 51. Em relação aos deslocamentos, considera-se, o valor máximo de 5 mm, estabelecido pela NBR 8800 (2008) para estruturas sujeitas a prática de atividades humanas rítmicas de forma repetitiva.

Tabela 48 - Limites de aceleração em RMS (ISO 2631/1, 1997)

Limites de aceleração em RMS ( $m/s^2$ )	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 49 - Limites de aceleração em RMS (SCI, 2009)

Limites de aceleração em RMS (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 50 - 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 51 - Limites de aceleração em VDV (ELLIS; LITTLER, 2004)

Aceleração em VDV (m/s <sup>1,75</sup> )	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

Tabela 52 - Acelerações verticais máximas

Situação de carregamento	Ponto de leitura de maior amplitude	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_{RMS}$ (m/s <sup>2</sup> )	VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
SC-1	7	0,070	0,051	0,122
SC-2	2	0,076	0,061	0,131
SC-3	3	0,083	0,070	0,155
SC-4	3	0,088	0,075	0,162
SC-5	3	0,095	0,081	0,182
SC-6	7	0,100	0,083	0,191
SC-7	6	0,103	0,095	0,198
SC-8	6	0,106	0,098	0,203
SC-9	3	0,108	0,100	0,205
SC-10	7	0,112	0,105	0,215
SC-11	3	0,157	0,128	0,309
SC-12	3	0,173	0,134	0,337
SC-13	7	0,218	0,177	0,402
SC-14	3	0,237	0,189	0,445
SC-15	2	0,259	0,213	0,486

Analisando a Tabela 52, é possível observar que todos os valores de aceleração de pico, referentes às 15 situações de carregamento nos pontos com maiores amplitudes de repostas, encontraram-se abaixo da faixa limite de 0,39m/s<sup>2</sup> a 0,68m/s<sup>2</sup> estabelecida por Guia prático do AISC (Murray et al.,2016). Neste contexto, observa-se que o mesmo comportamento para as 15 situações de carregamento, onde os valores das acelerações RMS não ultrapassaram os limites de conforto humano estabelecidos pela ISO 2631/1 (1997) e SCI (2009), bem como às acelerações em valores de doses de vibração (VDV) respeitaram os limites

aceitáveis estabelecidos por Setareh (2012) e Ellis e Littler (2004). Todos esses valores encontrados ao longo dessa investigação atendem aos critérios de conforto humano.

Ressalta-se ainda que todos os valores de deslocamento determinados nas dezesseis situações de carregamento estudadas (SC-1 a SC-15) 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-15 (128 pessoas) e foi da ordem de 0,48mm ( $d_{\text{máx}}=0,48\text{mm}$ ).

Além disso, constata-se que as maiores transferências de energia para o sistema estrutural, associados aos valores de aceleração apresentados na Tabela 52, foram verificadas para as situações de carregamento com maiores concentrações de pessoas. Portanto, a situação de carregamento SC-15 apresentou a maior transferência de energia para o piso misto.

## 8.7 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 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).

### 8.7.1 Parâmetros utilizados no modelo biodinâmico proposto

A modelagem biodinâmica proposta, descrita no capítulo 4, é caracterizada por um sistema com um grau de liberdade (S1GL), com objetivo de simular numericamente as ações humanas rítmicas, e, além disso, investigar o efeito da interação dinâmica ser humano-estrutura. As características dinâmicas dos sistemas

biodinâmicos foram determinadas por meio da resolução de um problema tradicional de otimização, via MATLAB (2017) mediante aplicação do método dos Algoritmos Genéticos (AG), tomando como base os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados.

Posteriormente, a aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo são 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. O Apêndice A apresenta o valor das características dinâmicas das pessoas, obtidas através dos testes experimentais descrito no capítulo 3.

### 8.7.2 Parâmetros utilizados no modelo desenvolvido por Faisca (2003)

Este modelo de carregamento foi desenvolvido após a realização de uma série de testes experimentais, resultando na determinação de uma função matemática denominada função Hanning. A representação matemática da função Hanning é descrita pela equação (43).

Neste trabalho, os parâmetros de entrada da função Hanning ( $CD$ ,  $K_p$  e  $T_c$ ), referentes às 15 (quinze) situações de carregamento, encontram-se descritos na Tabela 53. Cabe ressaltar que foram considerados os parâmetros referentes à ginástica aeróbica. Além disso, o peso ( $P$ ) foi definido com base no valor médio da massa das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios experimentais, deste modo, obteve-se uma massa de 74 Kg.

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[ 0,5 \quad 0,5 \cos \left( \frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\} \quad \text{Para } t \leq T_c \quad (43)$$

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

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

Tabela 53 - Parâmetros da função Hanning

Casos	Número de pessoas	CD	T(s)	T <sub>c</sub> (s)	K <sub>p</sub>	P(N)	f <sub>p</sub> (Hz)
1	16	0,93	0,4545	0,34	2,78	726	2,20
2	24	0,92					
3	32	0,92					
4	40	0,91					
5	48	0,89					
6	56	0,88					
7	64	0,88					
8	72	0,87					
9	80	0,86					
10	88	0,85					
11	96	0,84					
12	108						
13	112						
14	120						
15	128						

### 8.7.3 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 função matemática do carregamento dinâmico é apresentada na equação (44).

$$F(t) = G \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_{n,v} \text{sen}(2n\pi f_p t + \phi_n) \right\} \quad (44)$$

Onde F: representação matemática do carregamento no tempo em (N); G: peso de uma pessoa em (N); r<sub>n,v</sub>: coeficiente de Fourier induzida por v pessoas; n: número de termos de Fourier; v: número de pessoas; φ<sub>n</sub>: diferença de fase; f<sub>p</sub>: frequência do carregamento; t: tempo (s).

Neste trabalho, os parâmetros de entrada da função ( $v$ ,  $R_{1,v}$ ,  $R_{2,v}$ ,  $R_{3,v}$ ,  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$  e  $f_p$ ), referentes às 15 (quinze) situações de carregamento, encontram-se descritos na Tabela 53. Em relação ao peso do ser humano, o peso ( $G$ ) foi calculado através do emprego de um valor médio de massa do ser humano de 74 kg, representando a média da massa das 100 (Cem) pessoas que participaram dos ensaios experimentais.

Tabela 54 - Parâmetros da Função matemática desenvolvida por Ellis e Ji (2004)

Casos	Número de pessoas (v)	$R_{1,v}$	$R_{2,v}$	$R_{3,v}$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$	P(N)	$f_p$ (Hz)
1	16	1,282	0,483	0,186	$\pi/6$	$-\pi/6$	$\pi/2$	726	2,20
2	24	1,240	0,438	0,164					
3	32	1,211	0,409	0,150					
4	40	1,189	0,387	0,140					
5	48	1,172	0,371	0,132					
6	56	1,157	0,357	0,126					
7	64	1,144	0,346	0,121					
8	72	1,133	0,336	0,116					
9	80	1,124	0,3283	0,113					
10	88	1,115	0,320	0,109					
11	96	1,107	0,314	0,106					
12	108	1,096	0,305	0,103					
13	112	1,093	0,302	0,102					
14	120	1,087	0,297	0,099					
15	128	1,081	0,293	0,097					

#### 8.7.4 Análise comparativa dos resultados obtidos

As Figuras 152 a 155 apresentam a resposta dinâmica em termos de aceleração, no domínio do tempo, enquanto as Figuras 156 a 159 ilustram os gráficos da aceleração no domínio da frequência, referentes às quatro situações de carregamento analisadas (SC-1, SC-6, SC-10 e SC-15), no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica.

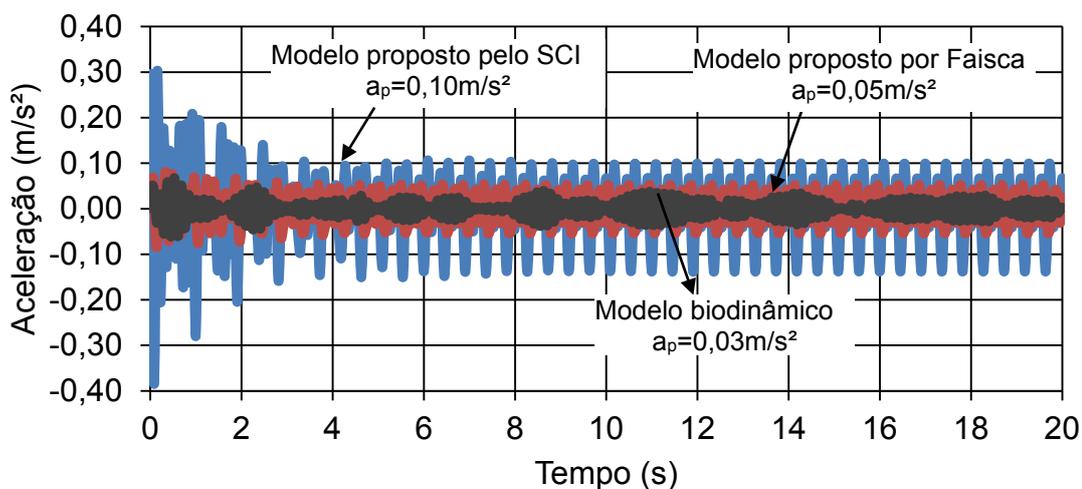


Figura 152 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-1 (ponto de análise 7)

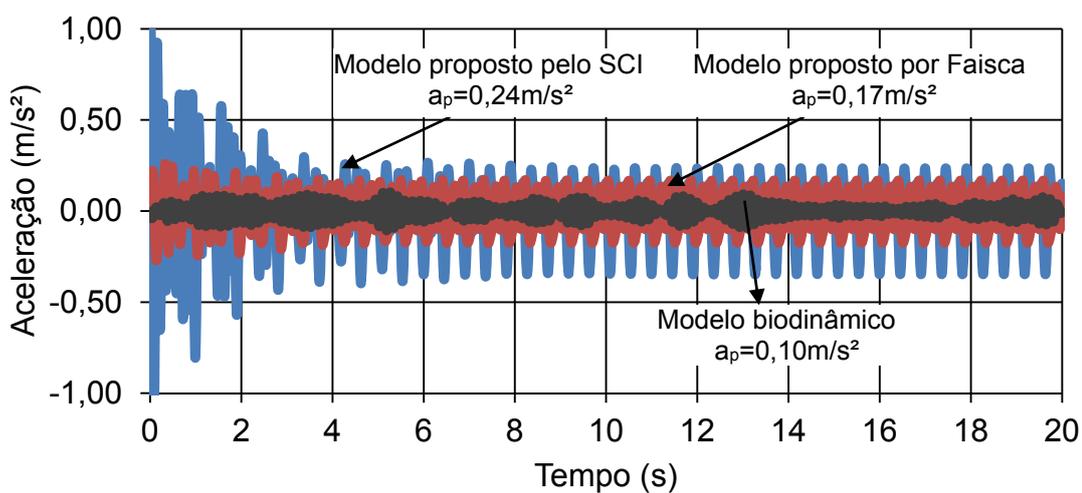


Figura 153 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-6 (ponto de análise 7)

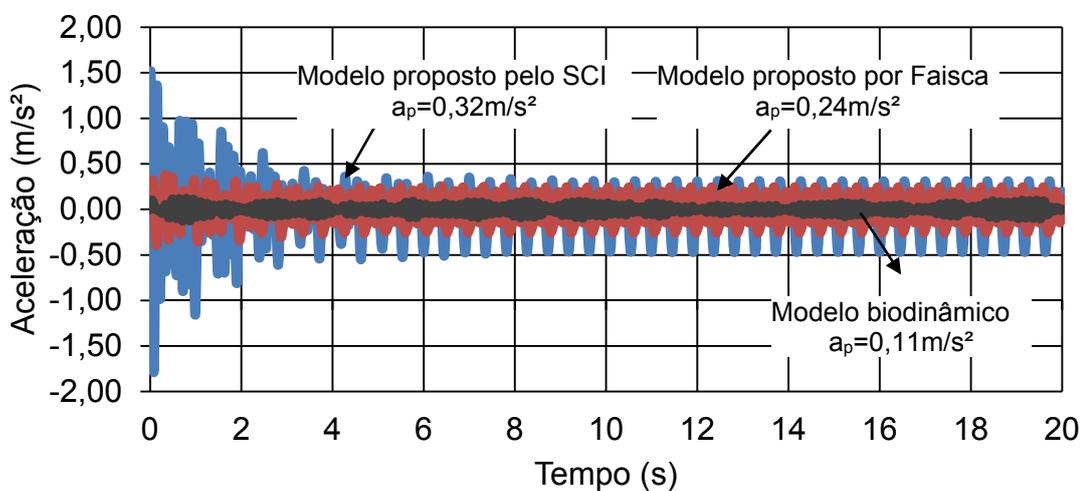


Figura 154 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-10 (ponto de análise 7)

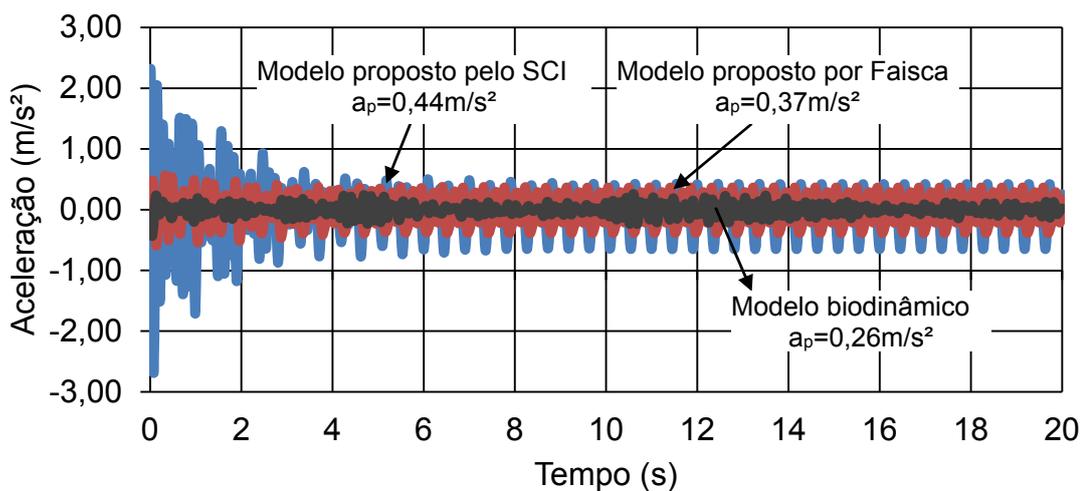


Figura 155 - Comparativo da aceleração no domínio do tempo: SC-15 (ponto de análise 2)

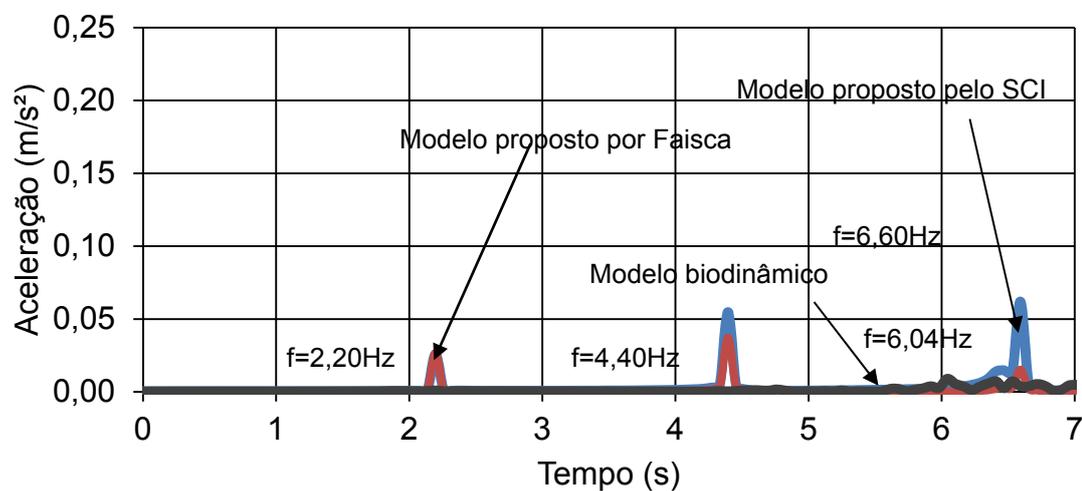


Figura 156 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-1 (ponto de análise 7)

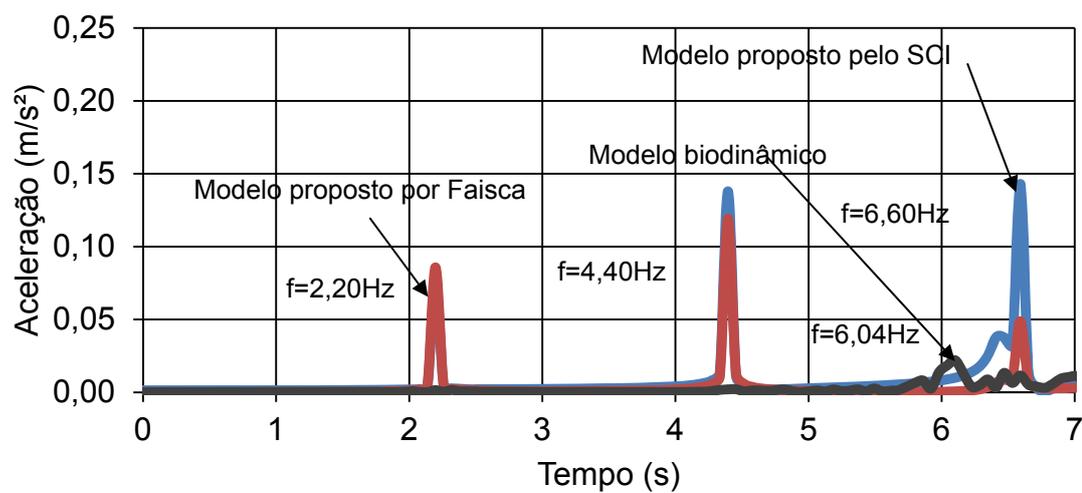


Figura 157 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-6 (ponto de análise 7)

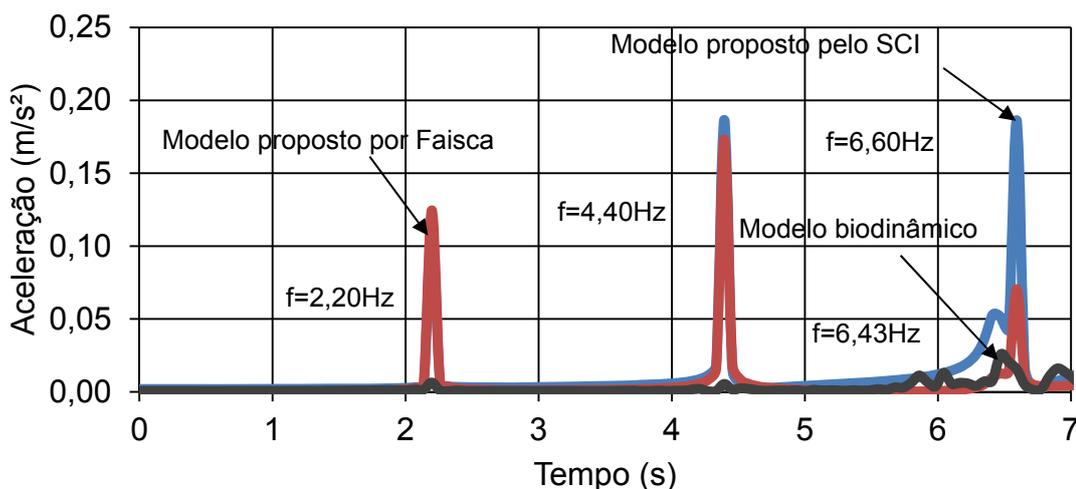


Figura 158 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-10 (ponto de análise 7)

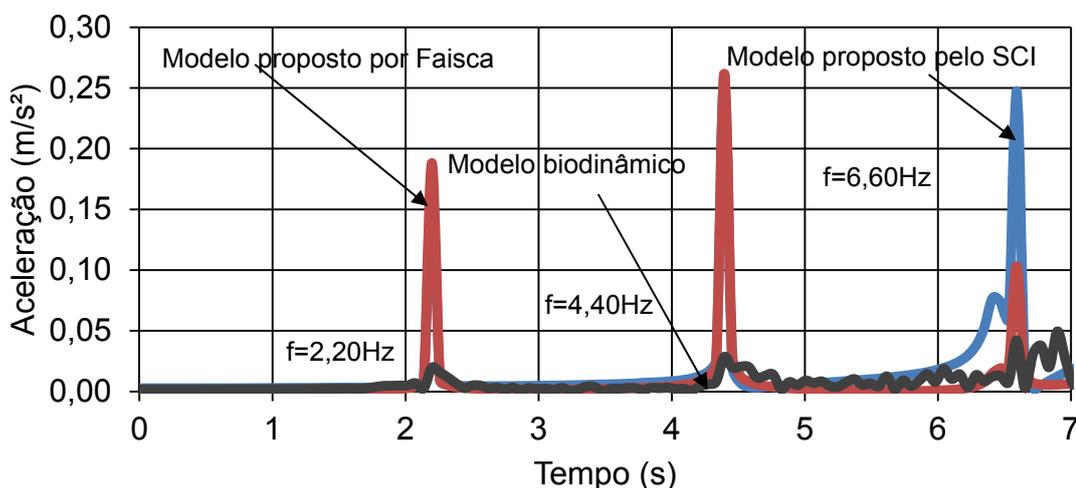


Figura 159 - Comparativo da aceleração no domínio da frequência: SC-15 (ponto de análise 2)

A análise comparativa da aceleração no domínio do tempo, apresentadas nas Figuras 152 a 155, demonstrou a influência dos seres humanos sobre a resposta estrutural, de tal modo que nota-se que o aumento da taxa de ocupação (presença humana) resulta no aumento dos valores de acelerações e deslocamentos do piso misto. Neste sentido, os valores mínimos da resposta dinâmica estrutural foi encontrada para a situação de Carregamento SC-1 (16 pessoas), enquanto os valores máximos encontram-se na situação de carregamento SC-15 (128 pessoas). Em termos quantitativos, os valores das acelerações de pico foram  $0,037 \text{ m/s}^2$  (modelo biodinâmico),  $0,05 \text{ m/s}^2$  (Faisca, 2003) e  $0,10 \text{ m/s}^2$  (SCI, 2009) para a situação de carregamento SC-1 (16 pessoas), enquanto obtiveram-se  $0,26 \text{ m/s}^2$

(modelo biodinâmico),  $0,37 \text{ m/s}^2$  (Faisca, 2003) e  $0,44 \text{ m/s}^2$  (SCI, 2009) para a situação de carregamento SC-15 (128 pessoas)

É possível observar com clareza que a aceleração de pico calculada mediante o emprego dos sistemas biodinâmicos (efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura), corresponde a cerca de 70% do valor de aceleração máxima obtida, via emprego do modelo de carregamento proposto por Faisca (2003), e da ordem de 60% do valor de pico obtido a partir do uso do modelo proposto pelo SCI (2009). Tal diferença demonstra a influência do amortecimento das pessoas no que diz respeito à atenuação da resposta estrutural dinâmica do sistema, corroborada em outras investigações (SALYARDS; FIRMAN III, 2011; SALYARDS; NOSS, 2014; SHAHABPOOR et al., 2017).

Nas Figuras 156 a 159, 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  $f_3=6,60\text{Hz}$ ), com exceção para a modelagem biodinâmica no terceiro harmônico. Nesse aspecto, as situações de carregamento SC-1, SC-6 e SC-10 apresentaram o valor de 6,04 Hz, 6,04 Hz e 6,43 Hz no terceiro harmônico, associadas às frequências naturais do piso misto estudado. Nesse contexto, ainda é possível verificar o aumento da transferência de energia para o piso misto, conforme se aumenta o número de pessoas presentes na estrutura, pois o carregamento dinâmico sobre o piso misto torna-se cada vez mais intenso.

Ao longo desta investigação, com base nos valores das acelerações de pico obtidas com base no emprego de modelos biodinâmicos, Faisca (2003) e SCI (2009), a resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto) estudado, mediante o emprego de sistemas biodinâmicos propostos neste trabalho, fornece valores de aceleração de pico menos conservativos, devido o efeito do amortecimento inerente à presença das pessoas sobre o piso misto (aço-concreto). Conseqüentemente, os picos de transferência de energia são menos elevados para avaliação da resposta dinâmica do sistema. Esta conclusão, sob o ponto de vista quantitativo e qualitativo, se repete ao longo de todo o trabalho de pesquisa, no que diz respeito a todas as situações de carregamento analisadas (SC-1 a SC-15), em todas as seções estruturais em estudo (oito pontos de leitura).

Portanto, ressalta-se que o emprego de sistemas biodinâmicos representativos do ser humano, considerando o efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura, demonstra uma tendência de representação mais realista acerca da ação dinâmica humana rítmica, evidentemente, com benefícios significativos para os estudos de 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 pessoas. A modelagem biodinâmica também incorpora, naturalmente, as diferenças de fase entre as pessoas, influenciando diretamente sobre os valores da resposta dinâmica do sistema (deslocamentos e acelerações máximas), e conseqüentemente na avaliação da resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto)

Verifica-se ainda que, as ações dinâmicas humanas representadas por modelos de carregamento de força dura (FAISCA, 2003; SCI, 2009) não incorporam o efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura, conseqüentemente fornecem valores de acelerações de pico conservativos, com maiores amplitudes em termos quantitativos, o que pode levar a concepção de projetos estruturais antieconômicos.

## 8.8 Considerações do capítulo

As respostas dinâmicas estrutural foram determinadas através da análise dinâmica, com base nas simulações numéricas realizadas pelo programa ANSYS (2009) para 15 situações de carregamento (SC-1 ao SC-15). A frequência de excitação das atividades humanas rítmicas foi igual a 2,20 Hz. Na sequência, as respostas dinâmicas em termos da aceleração máxima de pico, RMS e VDV foram determinadas, de tal modo que as maiores amplitudes ocorreram na situação de carregamento com o maior número de pessoas, ou seja, a situação de carregamento SC-15 (128 pessoas). Posteriormente, avaliou-se o conforto humano para as 15 situações de carregamento (SC-1 ao SC-15), e verificou-se que o piso misto está adequado no ponto de vista do conforto humano em todas as situações de carregamento. Por fim, uma análise comparativa das respostas dinâmicas, referentes à aceleração estrutural no domínio do tempo e frequência foi realizada

entre a modelagem biodinâmica e modelos de força dura provenientes de funções matemáticas (FAISCA, 2003; SCI, 2009), onde conclui-se que a modelagem biodinâmica apresentou as menores respostas dinâmicas.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 9.1 Introdução

Este trabalho de pesquisa tem o objetivo de investigar o comportamento estrutural dinâmico de um piso misto (aço-concreto), submetido às atividades aeróbicas, no que diz respeito à avaliação do conforto humano. Para tal, sistemas biodinâmicos foram propostos para representar a modelagem das ações humanas rítmicas, considerando a interação ser humano-estrutura mediante 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. O modelo estrutural analisado neste estudo corresponde a um piso misto (aço-concreto) com dimensões de 40m x 40m e uma área total de 1600m<sup>2</sup>, tendo sido submetido a carregamentos dinâmicos oriundos de atividades aeróbicas com frequência de excitação de 2,20 Hz, de tal modo que o primeiro harmônico da excitação ( $1 \times 2,20\text{Hz} = 2,20\text{Hz}$ ) causa um movimento ressonante do piso misto com o terceiro modo de vibração do sistema ( $f_{03}=6,65\text{Hz}$ ).

Os ensaios experimentais foram realizados por 100 (cem) indivíduos sobre uma plataforma rígida de MDF. Cada pessoa saltou com frequência de excitação de 2,20 Hz, mediante de estímulos provenientes de um metrônomo. Durante os ensaios, as medições da aceleração no centro de massa de cada pessoa foram realizadas mediante o uso de acelerômetros, enquanto as medições da força produzida pelos participantes sobre a plataforma de MDF foram realizadas através de três células de carga.

A partir dos valores de força, aceleração, velocidade e deslocamento encontrados com base no desenvolvimento dos testes experimentais, foram determinadas as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos, representativos dos indivíduos, por meio da resolução matemática de um problema tradicional de otimização, mediante emprego dos Algoritmos Genéticos (AG). Além disso, uma investigação acerca da correlação entre as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos foi realizada (resultados dos testes experimentais e do

problema numérico de otimização) e os resultados foram considerados satisfatórios para a representação da massa, a rigidez e o amortecimento do modelo biodinâmico.

O modelo biodinâmico proposto foi concebido a partir do uso de um sistema massa-mola amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), de modo que foram aplicados no domínio do tempo *versus* valores de aceleração, velocidade e deslocamento sobre o grau de liberdade da massa do modelo, enquanto que os valores de força foram aplicados diretamente sobre o sistema estrutural do piso misto.

A modelagem numérico-computacional do piso misto (aço-concreto) foi realizada através do programa ANSYS (2009), via método dos elementos finitos. Os elementos estruturais utilizados para representar as vigas e laje foram o BEAM44 (ANSYS, 2009) e SHELL63 (ANSYS, 2009), respectivamente. Por fim, foi utilizado o elemento de mola COMBIN40 (ANSYS, 2009) para a caracterização dos sistemas biodinâmicos representativos da interação indivíduo-estrutura.

Posteriormente a modelagem do piso misto via programa ANSYS (2009), realizou-se uma análise modal para obtenção das frequências naturais e dos modos de vibração para a estrutura vazia, bem como os valores dos parâmetros biodinâmicos (massa modal, rigidez modal e amortecimento modal). Em seguida, também foram obtidos os valores das frequências naturais e dos parâmetros dinâmicos referentes ao primeiro modo de vibração para o modelo estrutural analisado com o piso misto ocupado (presença dos indivíduos). Cabe ressaltar que a ocupação do piso misto foi realizada por meio de sistemas biodinâmicos, em que as pessoas são representadas paradas e em pé.

Em seguida, uma análise transiente foi realizada com o intuito de investigar quinze situações de carregamento distintas, através da obtenção das respostas dinâmicas do sistema estrutural, objetivando a determinação dos valores dos deslocamentos e acelerações máximas (domínio do tempo e da frequência). Desta maneira, o conforto humano foi avaliado com base nas acelerações de pico, acelerações RMS e 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 empregadas correntemente para o estudo deste tipo de problema (FAISCA, 2003; SCI, 2009).

## 9.2 Conclusões alcançadas

### a) Modelagem dos sistemas biodinâmicos

As características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos foram determinadas através do processo numérico de otimização, via utilização de Algoritmos Genéticos (AG), com base nos valores de força, aceleração, velocidade e deslocamento obtidos via realização dos testes experimentais.

A partir da obtenção das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos, e também dos valores da aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo para 100 (Cem) indivíduos distintos, obteve-se a força dinâmica otimizada para cada um dos testes experimentais realizados. Deste modo, objetivando validar os valores encontrados, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e conseqüentemente verificou-se uma correlação satisfatória entre o valor de força dinâmica obtida experimentalmente e o valor da força otimizada. Esta correlação foi avaliada no domínio do tempo e no domínio da frequência, o que demonstra que a força otimizada obtida se ajusta aos valores das ações dinâmicas obtidas nos ensaios experimentais realizados.

A correlação entre as relações massa-rigidez, massa-amortecimento e rigidez-amortecimento também foram verificadas com base no emprego do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), de tal modo que foram observadas correlações bastante satisfatórias entre as referidas características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos desenvolvidos ao longo deste estudo.

Estas comprovações associadas à correlação experimental-numérica asseguram a realização adequada dos testes experimentais, além da eficiência do processo numérico de otimização utilizado neste trabalho de pesquisa, além de

contribuir favoravelmente para a modelagem numérica dos sistemas biodinâmicos representativos da ação dinâmica humana (atividades aeróbicas).

Faz-se necessário destacar 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.

## b) Análise modal

A frequência fundamental do piso misto ( $f_{01}=6,06\text{Hz}$ ) investigado encontra-se abaixo do valor estabelecido pela norma brasileira NBR 6118 (2014) ( $f_n > 1,2 f_{\text{crítica}}$ ), valor este que deveria ser, no mínimo, igual a 9,6Hz. Deste modo, de acordo com as recomendações de projeto da NBR 6118 (2014) foi caracterizada a suscetibilidade do piso misto (aço-concreto) a problemas relacionados a vibrações excessivas.

Considerando-se a utilização de modelos biodinâmicos para representar os indivíduos parados e em pé sobre a laje de concreto, destaca-se que o comportamento dinâmico do sistema estrutural, apresentou modificações em relação aos valores dos parâmetros modais (frequência natural, massa modal, rigidez modal e amortecimento modal), devido à ocupação do piso em estudo. Ao longo das análises foi verificado que o valor da frequência fundamental do piso misto (aço-concreto) diminuiu na medida em que cresce a ocupação do piso misto (presença das pessoas), sendo que esta variação quantitativa foi pouco expressiva, da ordem de 3%, tendo em mente que a relação  $M_P/M_E$  ( $M_P$ : massa das pessoas;  $M_E$ : massa da estrutura), também é pequena, igual a 0,0194 (1,94%), para a situação limite em que 128 pessoas encontram-se sobre a laje de concreto. Por outro lado, o valor da taxa de amortecimento estrutural do sistema analisado aumentou de 1,2% (piso descarregado) para 13% (piso carregado: 128 pessoas), demonstrando a importância do efeito do amortecimento das pessoas para avaliações de conforto humano.

c) Resposta estrutural dinâmica: modelagem biodinâmica e análise de conforto humano

Os valores máximos de deslocamentos e acelerações, dentre as 15 (quinze) situações de carregamentos (SC-1 ao SC-15) investigadas, foram obtidos quando a laje de concreto foi ocupada por 128 pessoas (SC-15). Neste contexto, os valores mínimos (deslocamentos e acelerações) foram encontrados para as situações de carregamento com 16 pessoas (situação de carregamento SC-1). Deste modo, verificou-se que o piso misto (aço-concreto) estudado apresenta um comportamento esperado, pois os valores dos deslocamentos e das acelerações da estrutura aumentam à medida que ocorre um aumento na taxa de ocupação sobre o piso misto.

Com base na norma brasileira NBR 8800 (2008), observou-se que os deslocamentos translacionais verticais respeitaram os limites estabelecidos ( $d_{lim} = 5$  mm) para estruturas submetidas à prática de atividades humanas rítmicas de forma repetitiva. O deslocamento máximo encontrado neste estudo foi da ordem de 0,48 mm, referente à situação de carregamento SC-15 (128 pessoas).

Os valores de aceleração de pico, aceleração RMS e em valores de doses de vibração (VDV) mais elevados foram encontrados para a situação de carregamento SC-15 (Figura 129). Os valores encontrados ao longo do estudo, respectivamente, foram da ordem de  $0,448\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,448\text{m/s}^2$ ),  $0,148\text{m/s}^2$  ( $a_{RMS}=0,148\text{m/s}^2$ ) e  $0,339\text{m/s}^{1,75}$  ( $VDV=0,339\text{ m/s}^{1,75}$ ), referentes ao ponto de leitura 2 (Figura 130).

Os valores encontrados para as acelerações de pico, RMS e em valores de doses de vibração (VDV) obtidos em todas as quinze situações de carregamento estudadas neste trabalho de pesquisa (SC-1 a SC-15), em todos os oito pontos de leitura, encontram-se de acordo com a faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida pelo guia de projeto do AISC (Murray, 2016). Em relação às acelerações RMS encontradas, verificou-se que todos os valores obtidos nas seções investigadas não ultrapassam os valores limites aceitáveis estabelecidos pela norma ISO2631/1 (1997) e SCI (2009). Por fim, as acelerações em valores de doses de vibração (VDV), também respeitaram os limites aceitáveis estabelecidos por Setareh (2012) e Ellis e Littler (2004) em todas as seções do piso. Conseqüentemente, 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.

As transferências de energia mais significativas para a resposta estrutural dinâmica do modelo estrutural, no domínio da frequência, correspondem aos três harmônicos da excitação dinâmica humana rítmica ( $f_1=2,20\text{Hz}$ ;  $f_2=4,40\text{Hz}$  e  $f_3 = 6,60\text{Hz}$ ), especialmente em relação aos dois primeiros harmônicos. Contudo, em relação ao terceiro harmônico da excitação dinâmica (ressonância do sistema), verifica-se que o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura (modelos biodinâmicos), em relação às transferências de energia da resposta do piso, atuou de maneira a mobilizar modos de vibração com frequências naturais distintas da excitação, por exemplo, aqueles associados às frequências naturais do sistema iguais a  $6,60\text{Hz}$ ,  $6,43\text{Hz}$  e  $6,91\text{Hz}$ , respectivamente, variando de acordo com as características dinâmicas dos indivíduos e, também, conforme a situação de carregamento investigada. Deste modo, a modelagem dos sistemas biodinâmicos torna-se relevante, pois mobiliza modos de vibração próximos a faixa de ressonância da estrutura.

#### d) Modelos biodinâmicos versus modelos matemáticos tradicionais (“força dura”)

A resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto), determinada mediante o emprego da modelagem dos sistemas biodinâmicos representativos das pessoas, foi calculada e comparada com aquela fornecida com base no uso de modelos matemáticos tradicionais de força dura (Faisca, 2003; SCI, 2009). Em relação à modelagem biodinâmica, destaca-se que o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura é considerado por meio da aplicação dos valores experimentais de aceleração, velocidade e deslocamento sobre o grau de liberdade da massa do sistema biodinâmico e os valores de força são aplicados sobre o piso (laje de concreto). De outra maneira, os modelos de “força dura” são caracterizados pela aplicação apenas da força dinâmica diretamente sobre a laje de concreto, sem levar em conta as características dinâmicas das pessoas.

As acelerações máximas (acelerações de pico) foram calculados para a situação de carregamento extremo SC-15 (128 pessoas sobre o piso), tendo sido determinados os seguintes valores, respectivamente, de  $0,26\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,26\text{m/s}^2$ ) [modelagem biodinâmica];  $0,37\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,37\text{m/s}^2$ ) (Faisca, 2003) e  $0,45\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,45\text{m/s}^2$ ) (SCI, 2009). Destaca-se que é possível observar com clareza que a aceleração de pico calculada com base no emprego dos sistemas biodinâmicos (efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura), corresponde a cerca de 70% do valor de aceleração máxima obtida, via emprego do modelo de carregamento proposto por Faisca (2003), e da ordem de 60% do valor de pico obtido a partir do uso do modelo proposto pelo SCI (2009). Esta diferença nos resultados, corroboradas em outras investigações (SALYARDS; FIRMAN III, 2011; SALYARDS; NOSS, 2014; SHAHABPOOR et al., 2017), denota a influência do amortecimento das pessoas no que diz respeito à atenuação da resposta estrutural dinâmica do sistema, possível de ser levada em conta na análise apenas a partir da modelagem dos sistemas biodinâmicos (efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura).

Convém chamar a atenção do leitor, novamente, para o fato de que a partir de comparações quantitativas, realizadas ao longo desta investigação, entre os valores das acelerações de pico obtidas com base no emprego de modelos biodinâmicos, Faisca (2003) e SCI (2009), pode-se concluir, claramente, que a resposta estrutural dinâmica do modelo calculada com base no uso de sistemas biodinâmicos propostos neste trabalho de pesquisa, fornece valores de aceleração de pico menos conservativos, tendo em mente o efeito do amortecimento inerente à presença das pessoas sobre o piso misto (aço-concreto). Tal fato ocasiona, sem sombra de dúvidas, o surgimento de picos de transferência de energia menos elevados para avaliação da resposta dinâmica do sistema. Esta conclusão é relevante, sob o ponto de vista quantitativo e qualitativo, e se repete ao longo de todo o trabalho de pesquisa, no que tange a todas as situações de carregamento analisadas (SC-1 a SC-15), em todas as seções estruturais em estudo (oito pontos de leitura).

Neste sentido, ressalta-se que a avaliação da resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto), mediante o emprego de sistemas biodinâmicos representativos do ser humano, 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 benefícios significativos para a estudos de 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 pessoas; e, ainda, considerando-se 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). Além disso, verifica-se 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.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

- a) Realizar uma nova campanha de 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 atividades humanas rítmicas;
- b) Realizar testes experimentais sobre sistemas estruturais de piso reais, de maneira a comparar os valores da resposta dinâmica, a partir do uso da metodologia de análise desenvolvida neste trabalho de pesquisa e os resultados experimentais;
- c) Realizar testes experimentais com base em indivíduos atuando simultaneamente, considerando-se valores usuais de frequências de excitação humana, simulando atividades rítmicas, de maneira a avaliar os parâmetros dos sistemas biodinâmicos;
- d) Desenvolvimento de modelos biodinâmicos com maiores graus de liberdade, com o intuito de realizar 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 avaliar qualitativamente e quantitativamente, a influência deste efeito sobre a resposta dinâmica do sistema estrutural e sobre as avaliações de conforto humano.

## REFERÊNCIAS

AGU, E. *Modellierung der vertikalen menscheninduzierten Einwirkungen und Einwirkungseffekte für hüpfende Personen auf der Grundlage eines stochastischen Modells (Vertical Human-Induced Effects Modelling for People Jumping based on a Stochastic Model)*. Tese de Doutorado (documento em língua alemã) - Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften: Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Alemanha, 2013.

ALVES, N. K. C. *Cargas Dinâmicas devido a Pessoas em Movimento*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

ALLEN, D. E.; RAINER, J. H. Floor vibration. *Canadian Building Digest*, Division of Building Research, NRCC, Ottawa, Canada, pp. 173, 1975.

.

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.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons, 2003.

ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

AVELINO, A. F. *Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica*. Ed. Érica, 2008.

BACHMANN, H. et al. *Vibration problems in structures: practical guidelines*. Basel (Switzerland): Birkhäuser, 1995.

BARKER, C.; MACKENZIE, D. Calibration of the UK National Annex. *Proceedings of the International Conference*. Porto, Portugal, 2008.

BBC. Safety concerns over Manics gig. BBC News, Wales, 1999.

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.

BRANDT, A. *Noise and vibration analysis signal analysis: signal analysis and experimental procedures*. John Wiley & Sons, 2011.

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.

BROWNING, G. *Human perception of vibrations due to synchronised crowd loading in grandstands*. University of Bath, 2011.

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., SILVA, J. G. S. 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*, pp. 1-16, Florianopolis/SC, Brasil, 2017.

GASPAR, C.M.; GASPAR, C.M.; SILVA, J. G. S. Modelagem das ações humanas rítmicas e estudo de conforto humano sobre edifícios mistos (aço-concreto). *XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, pp. 1-17, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2015.

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. Avaliação do Conforto Humano de Pisos Mistos (Aço-Concreto) Submetidos a Atividades Humanas Rítmicas. *XIII Simpósio de Mecânica Computacional (XIII SIMMEC 2018)*, Vitória, v. 1. p. 1-19, 2018b.

CAPPELLINI, A. M. C. an Innovative Approach To Evaluate People'S Effects on the Dynamic Behaviour. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica, documento 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.

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 (r) Education, Inc., New Jersey, 2007.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, 634 p., 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.

CORREIO DO POVO. Venda de ingresso. Publicado em 21 de Maio de 2000, Disponível em: <https://www.correiodopovo.com.br/artesagenda/venda-de-ingressos-para-o-rock-in-rio-2019-come%C3%A7a-nesta-quinta-feira-1.332270>, Acesso em: 20 de maio de 2019.

DA SILVA, J.; VELLASCO, P. D. S.; DE ANDRADE, S.; DE LIMA, L. ; FIGUEIREDO, F. Vibration analysis of footbridges due to vertical human loads. *Computers & Structures*, 85, p 1693-1703, 2007.

DA SILVA, J.G; CAMPISTA, F.F.; GASPAR, C.M. Avaliação do Conforto Humano de Pisos de Edifícios Mistos (Aço-Concreto) com Base no Emprego de Modelos Biodinâmicos. *10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, pp. 1-17, Lisboa, Portugal, 2016.

DEPOSITPHOTOS. Stock video london uk. Publicado em 21 de Maio de 2000, Disponível em: <https://br.depositphotos.com/139589940/stock-video-london-uk-december-20-2016.html>, Acesso em: 20 de julho de 2018.

DIANATI, M.; SONG, I.; TREIBER, M. *An introduction to genetic algorithms and evolution strategies*. Technical report, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2002.

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. Floor vibration induced by dance-type loads: verification. *The Structural Engineer*, v. 3, p. 45–50, 1994.

ELLIS, B. R. and JI, T. Human-structure interaction in vertical vibrations. *Structure and Buildings* 122, pag 1–9, 1997.

ELLIS, B. R.; JI, T. Loads generated by jumping crowds: Numerical modelling. *Structural Engineer*, v. 82, n. 17, p. 35–40, 2004.

ERLINA, R.; PRIYOSULISTYO; SAPUTRA, A. Vibration Serviceability of Grha Sabha Pramana Auditorium under Human Induced Excitation. *Procedia Engineering*, v.171, p. 1157–1164, 2017.

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.

FOSCHI, R. O.; NEUMANN, G. A.; YAO, F.; FOLZ, B. Floor vibration due to occupants and reliability-based design guidelines. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22, 471-479, 1995.

FREEKIP. Publicado em 21 de Maio de 2000, Disponível em: [https://br.freepik.com/fotos-premium/pessoas-correndo-em-uma-ponte\\_1013725.htm](https://br.freepik.com/fotos-premium/pessoas-correndo-em-uma-ponte_1013725.htm), Acesso em: 20 de julho de 2018

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.

GNT. Exercícios aeróbicos para perder barriga veja que e infalivel.. Publicado em 21 de Maio de 2000, Disponível em: <http://gnt.globo.com/bem-estar/materias/exercicios-aerobicos-para-perder-barriga-veja-o-que-e-infalivel.htm>, Acesso em: 20 de julho de 2018.

GRIFFIN, M. *Handbook of Human Vibration*. 1st Edition. Ed. Academic Press, 1996.

HAN, H.; ZHOU, D.; JI, T. *Mechanical parameters of standing body and applications in human-structure interaction*. *Int. J. Appl. Mech.* 9(2), 2017.

HANAGAN, L. M. Walking-Induced Floor Vibration Case Studies. *Journal of Architectural Engineering*, v. 11, n. 1, mar, 2005.

HE, W., XIE, W. & LIU, L.. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Standing People on Dynamic Properties of a Beam-Like Bridge. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.

HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.

HOTHAN, S. *Einfluß der Verkehrslast – Mensch – auf das Eigenschwingungsverhalten von Fußgängerbrücken und die Auslegung linearer Tilger*. Thesis (Dipl.-Ing.). Universität Hannover, Hanover, Germany, 1999.

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 5982*. International Organization for Standardization. Bases for Design of Structures. - Vibration and Shock-Mechanical driving point impedance of the human body, 1981.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 7962*. Mechanical Vibration and Shock-mechanical transmissibility curves of the human body in the z direction. International Standard, 1987.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2631-1*: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. Switzerland, 1997. JI, T.; ELLIS, B. R. Floor vibration induced by dance-type loads: theory. *The Structural Engineer*, v. 72, n. 3, 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2631-2*: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 to 80Hz), Switzerland, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10137*: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations, Switzerland, 2007.

Ji, T.; Ellis, B. R. A continuous model for the vertical vibration of the human body in a standing position. UK Informal Group Meeting on Human Response to Vibration, Silsoe, UK, pp. 18–20, 1995.

JIN, Q., SUN, Z., JIA, L., WANG, Q., HOU, M., MA, Y., XU, C. Human induced vibration of flooring-systems in a high-rise building. *Applied Mechanics and Materials* 2014.

Joint Working Group IStructE/DCLG/DCMS. Dynamic Performance Requirements for Permanent Grandstands: Recommendations for Management Design and Assessment. *Institution of Structural Engineers*, London, 2008.

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.

JONES, C. A.; PAVIC, A., REYNOLDS, P. & HARRISON, R. E.. Verification of equivalent mass–spring–damper models for crowd–structure vibration response prediction. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38, 1122-1135, 2011a.

LITTLER, J. D. Measuring the dynamic response of temporary grandstands, *EURODYN'96*, pp. 907-913, 1996.

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.

LEE, K. et al. Global vertical resonance phenomenon between steel building and human rhythmic excitations. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 92, p. 164–174, 2014.

MANCHESTEREVENINGNEWS. Robbie fans in danger at cricket ground gig. Manchester- Evening-News, 2007.

MATLAB. Versão R2017a. MathWorks, 2017.

MATSUMOTO, Y.; GRIFFIN, M. J. Dynamic Response of the Standing Human Body Exposed To Vertical Vibration: Influence of Posture and Vibration Magnitude. *Journal of Sound and Vibration*, v. 212, n. 1, p. 85–107, 1998.

MCDONALD, M. G. *Experimental Characterisation of Jumping and Bobbing Actions for Individuals and Small Groups*. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia, documento 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*, 37, 97-115, 2003.

MORELAND, R. The weight of a crowd. *Engineering*, v. 79, p. 551, 1905.

MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 1997.

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.

MURRAY, T. M. et al. Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity: AISC DG11 Second Edition. Chicago, USA, 2016.

MUKAKA, M.M. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Med. J.* 24 , 69–71, 2012.

NHLEKO, S., ZINGONI, A., MOYO, P. A variable mass model for describing load impulses due to periodic jumping. *Engineering Structures*, 30, pp. 1760-1769, 2008.

NIGAN S.P., MALIK M. A Study on a Vibration Model of a Human Body. *Journal of Biomechanical Engineering*, Transactions of ASME. Vol. 109, pp. 148-153, May, 1987.

NHLEKO, S., WILLIAMS, M. & BLAKEBOROUGH, A. Vibration perception and comfort levels for an audience occupying a grandstand with perceivable motion. *27<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC XXVII)*, 2009.

NIGG, B. M., LIU, W. The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running". *Journal of Biomechanics*. pp. 849-856, 1999.

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, *PUCRio*, 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

QIN, J. W., YANG, Q. S. AND YANG, N. Modal parameters of human body-structure static interaction systems. *Journal of Vibration and Shock* 31, p 150–157, 2012.

QIN, J. W.; LAW, S. S.; YANG, Q. S.; YANG, N. Pedestrian–bridge dynamic interaction, including human participation. *Journal of Sound and Vibration* 332, p 1107–1124, 2013.

RACIC, V.; BROWNJOHN, J. M. W.; PAVIC, A. Reproduction and application of human bouncing and jumping forces from visual marker data. *Journal of Sound and Vibration*, v. 329, n. 16, p. 3397–3416, 2010.

RACIC, V.; CHEN, J. Data-driven generator of stochastic dynamic loading due to people bouncing, *Computers and Structures*, v.158, p. 240–250, 2015.

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.

RODOWANSKI, I.J. *Plataforma de força instrumentada: uma ferramenta aplicada a estudos de posturologia* [ph.d. Tese]. Universidade federal da bahia, brasil, 2011.

RODRIGUES, J. & ALMEIDA, P. Modeling of action induced by crowds on brazilian football stadium. *Conference: IMAC XXIV–Conference & Exposition on Structural Dynamics*, 2006.

SACHSE, R., PAVIC, A., REYNOLDS, P. Human-Structure Dynamic Interaction in Civil Engineering Dynamics: A Literature Review. *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, No. 1, pp. 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. & FIRMAN III, R. J. Human-Structure Interaction: Effects of Crowd Characteristics. *Civil Engineering Topics*, Volume 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*, p 458-465, 2014.

SALYARDS, K. A.; HUA, Y. Assessment of dynamic properties of a crowd model for human–structure interaction modeling,” *Engineering Structures* 89, p 103–110, 2015.

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, 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. H., BLAKEBOROUGH, A. & WILLIAMS, M. S. Dynamic loads due to rhythmic jumping and bobbing. In: Schueller, C. S. G. I. (ed.) *Structural Dynamics: EURO DYN 2005*. Paris, France, 2005.

SIM, J.; BLAKEBOROUGH, A.; WILLIAMS, M. Modelling effects of passive crowds on grandstand vibration. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, v. 159, n. SB5, p. 261–272, 2006.

SIM, J. et al. Statistical model of crowd jumping loads. *ASCE Journal of Structural Engineering*, v. 134, n. 12, p. 1852–1861, 2008.

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.

SOEIRO, N. S. Curso de Análise de Ruído e Vibrações. Belém: *Curso de Especialização em Engenharia e Segurança do Trabalho*. UFPA, 2009.

TILDEN, C. J. Kinetic effects of crowds. *Proceedings ASCE* 39, 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.

TOTALCONTROL. Boate. Publicado em 21 de Maio de 2000, Disponível em: [https://totalcontrol.com.br/novo/arquivos/portfolio\\_tag/boate](https://totalcontrol.com.br/novo/arquivos/portfolio_tag/boate), Acesso em: 20 de julho de 2018.

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.

VARELA, W. D. *Modelo Teórico-Experimental para Análises de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando sobre Lajes de Edifícios*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2004.

ZHENG, X. & BROWNJOHN, J. M. W. Modeling and simulation of human-floor system under vertical vibration. *SPIE's 8<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, 2001.

ZHOU, D. et al. Comparison of two models for human-structure interaction. *Applied Mathematical Modelling*, v. 40, n. 5–6, p. 3738–3748, 2016a.

ZHOU, X. et al. Vibration serviceability of pre-stressed concrete floor system under human activity. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 2479, n. December, p. 1–11, 2016b.

ZIVANOVIC S.; DIAZ I.M.; PAVIC A. Influence of walking and standing crowds on structural dynamic performance. 27<sup>th</sup> I Modal Anal Conf 2009, 2009.

WILLIAMS, C.; Rafiq, M.Y.; Carter, A. Human structure interaction: The development of an analytical model of the human body in Vibration. *Noise and Structural Dynamic*. Venice, Italia. Staffordshire University Press, p 32 – 39, 1999.

YAO, S.; WRIGHT, J. R.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Forces generated when bouncing or jumping on a flexible structure. *ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering*. Katholieke Universiteit Leuven, 2002.

YAO, S., WRIGHT, J. R., PAVIC, A. & REYNOLDS, P. Experimental study of human-induced dynamic forces due to jumping on a perceptibly moving structure. *Journal of Sound and Vibration*, 296, 150-165, 2006.

G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/02/21/predio-e-evacuado-no-abc-apos-50-funcionarios-pularem-ao-mesmo-tempo-durante-palestra-motivacional.ghtml>. Acesso em 18 dez. 2014.

PHILLYMAG. Disponível em: <https://www.phillymag.com/be-well-philly/2017/04/25/trampoline-fitness-be-well-philly-boot-camp/>. Acesso em 18 dez. 2014.

UNGESANDLYCRA. Disponível em: <http://lungesandlycra.co.uk/review-oxygen-freejumping-trampoline-park/>. Acesso em 18 dez. 2014.

JUMPING-FITNESS. Disponível em: <https://www.jumping-fitness.com/en/foto/90>. Acesso em 18 dez. 2014.

**APÊNDICE A** – Valores das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos da modelagem biodinâmica proposta das pessoas 1 a 100

Tabela 55 - Valores das 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 das 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 das 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 das 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 ( $r$ ) entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 1 a 100

Tabela 59 - Correlação de Pearson ( $r$ ) entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 1 a 25

Pessoa	Coeficiente de Pearson ( $r$ ) entre $F_{d1}$ x $F_d$	
	Domínio da frequência	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 (r) entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 26 a 50

Pessoa	Coeficiente de Pearson (r) entre $F_{d1}$ x $F_d$	
	Domínio da frequência	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 (r) entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 51 a 75

Pessoa	Coeficiente de Pearson (r) entre $F_{d1}$ x $F_d$	
	Domínio da frequência	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 (r) entre a força experimental ( $F_{d1}$ ) e a força otimizada ( $F_d$ ) das pessoas 76 a 100

Pessoa	Coeficiente de Pearson (r) entre $F_{d1}$ x $F_d$	
	Domínio da frequência	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** – Características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos consideradas para as situações de carregamento SC-1 a SC-15

Na situação de carregamento SC-1, considera-se as pessoas numeradas de 1 a 16, presentes na Tabela 55 (apêndice A), enquanto a SC-2 foi simulada pelas pessoas numeradas de 1 a 24, apresentadas na Tabela 55 (apêndice A).

Em relação à situação de carregamento SC-3, foram consideradas todas as pessoas contidas na Tabela 55, e adicionalmente, as pessoas numeradas de 26 a 32 encontradas na Tabela 56. Seguindo o mesmo comportamento, as situações de carregamento SC-4 e SC-5 também simularam todas as pessoas contidas na Tabela 55, além das 15 e 23 primeiras pessoas da Tabela 56, respectivamente.

A partir da situação de carregamento SC-6, as pessoas descritas na Tabela 57 são utilizadas, deste modo, as SC-6, SC-7 e SC-8, simularam as características dinâmicas das todas as pessoas presentes nas Tabelas 55 e 56, e também consideraram as 6, 14 e 22 primeiras pessoas da Tabela 57, respectivamente.

As situações de carregamento SC-9, SC-10 e SC-11 foram representadas através das pessoas contidas nas Tabelas 55 a 57, além das 5, 13 e 21 primeiras pessoas contidas na Tabela 58, respectivamente. Finalmente, as situações de carregamento SC-12, SC-13, SC-14 e SC-15 utilizaram todas as pessoas contidas nas Tabelas 55 a 57, e também as 8, 12, 20 e 28 primeiras pessoas apresentadas na Tabela 58, respectivamente.